



Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

Ivica Ančić

**ENERGETSKA UČINKOVITOST I  
EKOLOŠKA PRIHVATLJIVOST BRODSKIH  
INTEGRIRANIH ENERGETSKIH SUSTAVA**

DOKTORSKI RAD

ZAGREB, 2016.



Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

Ivica Ančić

**ENERGETSKA UČINKOVITOST I  
EKOLOŠKA PRIHVATLJIVOST BRODSKIH  
INTEGRIRANIH ENERGETSKIH SUSTAVA**

DOKTORSKI RAD

Mentor:

prof. dr. sc. Ante Šestan

ZAGREB, 2016.



University of Zagreb

Faculty of Mechanical Engineering and Naval  
Architecture

Ivica Ančić

**ENERGY EFFICIENCY AND  
ENVIRONMENTAL IMPACT OF MARINE  
INTEGRATED POWER SYSTEMS**

DOCTORAL THESIS

Supervisor:

prof. dr. sc. Ante Šestan

ZAGREB, 2016.

## Sadržaj

ZAHVALA.....	I
PREDGOVOR .....	III
SAŽETAK.....	IV
ABSTRACT .....	V
KLJUČNE RIJEČI .....	VI
POPIS OZNAKA .....	VII
POPIS SLIKA .....	XI
POPIS TABLICA.....	XIII
1. UVOD .....	1
1.1. Značaj energetske učinkovitosti i ekološke prihvatljivosti .....	1
1.2. Integrirani energetske sustavi .....	7
2. CILJ ISTRAŽIVANJA .....	13
2.1. Metodologija i plan istraživanja .....	15
3. ENERGETSKA UČINKOVITOST I EKOLOŠKA PRIHVATLJIVOST.....	17
3.1. Pojam energetske učinkovitosti.....	17
3.2. Pojam ekološke prihvatljivosti .....	20
4. OCJENA ENERGETSKE UČINKOVITOSTI BRODA.....	28
4.1. Sadašnji pristup ocjeni energetske učinkovitosti – EEDI .....	28
4.1.1. Zahtijevani EEDI.....	29
4.1.2. Postignuti EEDI.....	33
4.1.3. EEDI tehnički zapisnik.....	37
4.1.4. Kritički osvrt na trenutni pristup definiranju EEDI-a .....	39
4.2. Analiza flote ro-ro putničkih brodova .....	43
4.2.1. Analiza tehničkih značajki flote ro-ro putničkih brodova.....	43

4.2.2.	Analiza energetske i ekološke značajke flote ro-ro putničkih brodova.....	64
4.3.	Metodologija proračuna <i>Postignutog EEDI</i> -a.....	68
4.3.1.	Metodologija proračuna <i>Postignutog EEDI</i> -a prema važećim propisima.....	68
4.3.2.	Alternativna metodologija proračuna <i>Postignutog EEDI</i> -a.....	70
4.3.3.	Predložena metodologija proračuna <i>Postignutog EEDI</i> -a.....	73
4.4.	Metodologija proračuna <i>Zahtijevanog EEDI</i> -a .....	81
4.4.1.	Trenutni pristup definiranja <i>EEDI</i> referentne krivulje .....	81
4.4.2.	Predloženi pristup definiranja <i>EEDI</i> referentne plohe .....	92
4.4.3.	Trenutni pristup definiranju faktora smanjenja <i>X</i> .....	99
4.4.4.	Predloženi pristup definiranja faktora smanjenja <i>X</i> .....	100
5.	INDEKS ENERGETSKE UČINKOVITOSTI I EKOLOŠKE PRIHVATLJIVOSTI ...	101
5.1.	Analiza emisije $\text{NO}_x$ spojeva .....	102
5.2.	Analiza emisije $\text{SO}_x$ spojeva.....	106
5.3.	Definicija indeksa energetske učinkovitosti i ekološke prihvatljivosti.....	108
5.4.	Analiza osjetljivosti.....	112
5.5.	Energetske i ekološke značajke integriranih energetske sustava.....	113
6.	ZAKLJUČAK .....	116
6.1.	Zaključna razmatranja doktorskog rada .....	116
6.2.	Smjernice za daljnja istraživanja.....	118
7.	LITERATURA.....	119
	ŽIVOTOPIS DOKTORANDA .....	126
	BIOGRAPHY OF THE PhD CANDIDATE .....	127

## ZAHVALA

Najprije, htio bih zahvaliti svojemu mentoru prof. dr. sc. Anti Šestanu. Pod njegovim sam mentorstvom sazrijevao najprije kao inženjer, potom kao mladi istraživač, ali uvijek kao osoba. Veliki dio zasluga za dovršenje ovoga doktorata ide najprije njemu.

Također bih zahvalio doc. dr. sc. Nikoli Vladimiru. Nikola je uvijek bio uz mene, ne samo zato jer mu je soba odmah pored moje, već i zato jer je uvijek bio dostupan i susretljiv. Rado je pomagao oko brojnih nedoumica i nejasnoća s kojima sam se susretao na svakodnevnoj bazi. Njegova pitanja „Kad će više taj doktorat?“ su bila jedan od većih motiva za dovršetak ovoga doktorata.

Veliko hvala i brojnim kolegama i prijateljima koji su pomagali na svakojake načine, od upućivanja na literaturu, davanja poticaja, vođenja plodonosnih rasprava tijekom i nakon ručka pa i time što su me povremeno jednostavno upitali „Kako si?“. Zahvalio bih i onima koji su sumnjali u mene jer su time budili u meni inat da im pokažem da su u krivu.

Posebno bih zahvalio pokojnom mr. sc. Nebojši Buktenici. On je bio izuzetno blizak nama brodstrojarima tijekom preddiplomskog i diplomskog studija, a znanja i iskustva koja nam je prenio su i danas od neprocjenjive vrijednosti. Nadam se da ovaj doktorat zadovoljava barem minimum njegovih kriterija, možda jednoga dana to i saznam.

Na kraju bih zahvalio Valentini koja je bila uvijek uz mene i koja je vjerojatno najviše slušala o mojim problemima u izradi ovoga rada. Iako nisi znala uvijek ponuditi rješenje, samo slušanje je često bilo još važnije.

*Onome kome je ime suvišno*

*Upisati na papir jer je zauvijek urezano*

*U srcu!*

*(1911-)*

## PREDGOVOR

Energetska učinkovitost i ekološka prihvatljivost postaje sve prisutnijim i sve važnijim pitanjem u svakoj, pa tako i u brodograđevnoj i pomorskoj industriji. Brodski prijevoz se smatra jednim od energetske najučinkovitijih načina prijevoza tereta. Stoga bi se moglo postaviti pitanje motivacije ovoga istraživanja. Čemu povećanje energetske učinkovitosti prijevoza koji je već ionako energetske učinkovitiji od ostalih?

Ovo istraživanje ne proučava samo energetske učinkovitost brodova, već i njihovu ekološku prihvatljivost. Iako brodski prijevoz jest energetske učinkovitiji od ostalih vrsta prijevoza, nije moguće tvrditi da je i ekološki prihvatljiviji jer brodovi koriste teško gorivo sa značajnim masenim udjelom sumpora čiji su produkti izgaranja osobito opasni za okoliš.

Zahtjevi za povećanje energetske učinkovitosti i ekološke prihvatljivosti su najčešće nametnuti industriji od strane međunarodnih organizacija po principu da svaka industrija mora doprinijeti razmjerno smanjenju onečišćenja okoliša. Tako trenutno važeća regulativa propisuje metodologiju ocjene energetske učinkovitosti brodova s ciljem smanjenja onečišćenja okoliša i poticanja primjene inovativnih energetske učinkovitih tehnologija. Međutim, ta metodologija nije univerzalno primjenjiva i ne daje ispravnu sliku utjecaja broda na okoliš te će u sklopu ovoga istraživanja biti predloženo njeno unaprjeđenje.

Posebno je potrebno istaknuti da namjera ovoga rada nije predlaganje nove regulative, već predlaganje metodologije kojom bi se mogla dati integralna ocjena energetske učinkovitosti i ekološke prihvatljivosti brodova. Na temelju te metodologije, mogli bi se u budućnosti postavljati zahtjevi s ciljem smanjenja onečišćenja pomorskog okoliša.



## SAŽETAK

Suvremena rješenja u razvoju brodskih energetske sustava (BES) zasnivaju se sve češće na integriranim energetske sustavima (IES), čija je glavna značajka centralizirana proizvodnja ukupno potrebne količine električne energije korištenjem raznovrsnih pogonskih strojeva i uređaja, primjena elektromotornih propulzijskih sustava i visoki stupanj utilizacije otpadne toplinske energije.

Sadašnje normativne metode za ocjenu energetske učinkovitosti i ekološke prihvatljivosti BES-a temelje se na Projektnom indeksu energetske učinkovitosti (eng. *Energy Efficiency Design Index* – EEDI) koji je definiran kao relativni omjer između ekvivalentne emisije CO<sub>2</sub> i pripadajućeg gospodarskoga učina broda. Iskustvo u primjeni EEDI-a pokazuje da nije primjenjiv za IES-e. U sklopu ovoga doktorata analizirana je povezanost različitih parametara koji utječu na energetske i ekološke značajke različitih konfiguracija IES-a. Na temelju te analize definirana je metodologija pomoću koje se u brodograđevnoj praksi može valorizirati indeks energetske učinkovitosti i ekološke prihvatljivosti (eng. *Index of Energy Efficiency and Environmental Eligibility* – I4E) različitih konfiguracija BES-a (uključujući IES-e). Primjenom I4E na flotu ro-ro putničkih brodova pokazano je da je integralni utjecaj brodova s IES-ima na okoliš manji od brodova s konvencionalnim BES-ima.

## ABSTRACT

Modern approach to the marine power system design is more often based on integrated power systems. These systems are characterized by the centralized production of the electrical energy from different prime movers, application of the electrical propulsion system and a high utilization factor.

Current regulations introduced Energy Efficiency Design Index (EEDI) as a technical measure to increase ships efficiency. The methodology of EEDI calculation is based on the relative CO<sub>2</sub> emission from ship power system and on the benefit for the society. This methodology is not applicable for integrated power systems (IPS). Hence, the analysis of different parameters influencing ship energy efficiency and overall environmental impact is performed. A new model is defined that can be widely used to evaluate the ships energy efficiency and environmental impact through the Index of Energy Efficiency and Environmental Eligibility (I4E). By calculating the I4E for a fleet of ro-ro passenger ships it has been observed that ships with IPS have lower overall environmental impact than ships with conventional power systems.

## **KLJUČNE RIJEČI**

- EEDI
- energetska učinkovitost
- ekološka prihvatljivost
- integrirani energetske sustav
- ro-ro putnički brod

## **KEYWORDS**

- EEDI
- energy efficiency
- environmental impact
- marine integrated power plant
- ro-ro passenger ship

## POPIS OZNAKA

$a$	parametar referentnih krivulja/ploha, -,
$B_s$	širina broda, m,
$b$	parametar referentnih krivulja/ploha, -,
$C_F$	koeficijent pretvorbe goriva u CO <sub>2</sub> , kg CO <sub>2</sub> /kg goriva,
$CO2_{AE}$	emisija CO <sub>2</sub> pomoćnih motora pri 50% maksimalne trajne snage prema NO <sub>x</sub> tehničkom zapisniku, g CO <sub>2</sub> /h,
$CO2_{ME}$	emisija CO <sub>2</sub> porivnih motora pri 75% maksimalne trajne snage prema NO <sub>x</sub> tehničkom zapisniku, g CO <sub>2</sub> /h,
$CO2_{OTHER}$	emisija CO <sub>2</sub> ostalih pogonskih strojeva na brodu (kotlovi, incineratori itd.) pri referentnim uvjetima plovidbe, g CO <sub>2</sub> /h,
$CO2_{RED}$	smanjenje emisije CO <sub>2</sub> uslijed korištenja tehnologija koje inhibiraju proizvedeni CO <sub>2</sub> (skladištenjem ili kemijskom pretvorbom), g CO <sub>2</sub> /h,
$c$	parametar referentnih krivulja/ploha, -,
DWT	najveća masa tereta koju brod može prevoziti, t,
$d_s$	gaz broda, m,
$Fr$	Froudeov broj, -,
$f_l$	faktor smanjene nosivosti zbog opreme za teret, -,
$f_c$	korekcijski faktor smanjene zapremine, -,
$f_{eff}$	faktor dostupnosti inovativnih energetski efikasnih tehnologija, -,
$f_i$	faktor smanjene nosivosti zbog tehničkih ili regulatornih ograničenja, -,
$f_j$	korekcijski faktor zbog posebnih konstrukcijskih značajki broda, -,
$f_w$	faktor stanja mora, -,

$f(x_i)$	vrijednost funkcije u točki $i$ , -,
$GT$	bruto tonaža broda, -,
$g$	gravitacijsko ubrzanje, $m/s^2$ ,
$H_d$	donja ogrjevna moć goriva, MJ/kg,
$I4E$	indeks energetske učinkovitosti i ekološke prihvatljivosti, ekvivalent onečišćenja/t nm,
$L_{wl}$	duljina broda na vodnoj liniji, m,
$L_{pp}$	duljina broda između okomica (perpendikulara), m,
$N$	ukupan broj promatranih brodova, -,
$NO_x Indeks$	indeks emisije $NO_x$ spojeva, g $NO_2$ /t nm,
$n$	brzina vrtnje motora, o/min,
$P$	snaga motora na kočnici, kW,
$P_{AE}$	snaga pomoćnih motora potrebna isključivo za podmirenje energetskih potreba sustava propulzije i potrebe smještaja pri normalnom stanju plovidbe, kW,
$P_{AEeff}$	smanjenje snage pomoćnih motora zbog inovativnih energetski učinkovitih električnih tehnologija, kW,
$P_D$	snaga predana propulzoru, kW,
$P_{ME}$	75% $P_{MCR}$ (maksimalne trajne snage) instaliranih glavnih motora nakon oduzimanja snage vrtilnih generatora, kW,
$P_{PTI} \dots$	75% nazivne snage instaliranih vrtilnih motora podijeljenog s prosječnim stupnjem korisnosti dizel-električnih agregata, kW,
$P_T$	snaga poriva, kW,
$P_R$	snaga otpora broda, kW,

$P_{dov}$	snaga dovedena motoru, kW,
$P_e$	efektivna snaga motora (na kočnici), kW,
$P_{eff}$	doprinos inovativnih energetski učinkovitih mehaničkih tehnologija pri 75% $P_{MCR}$ glavnog motora, kW,
$R^2$	koeficijent determinacije,
$S$	oplakivana površina broda, m <sup>2</sup> ,
$S_F$	faktor pretvorbe goriva u SO <sub>2</sub> , kg SO <sub>2</sub> /kg goriva,
$SO_x Indeks$	indeks emisije SO <sub>x</sub> spojeva, g SO <sub>2</sub> /t nm,
$SFC$	specifična potrošnja goriva, g/kWh,
$V$	volumen svih zatvorenih prostora na brodu, m <sup>3</sup> ,
$v$	brzina broda, m/s,
$v_{ref}$	brzina koja se može postići u referentnim uvjetima, tj. pri $P_{ME}$ i punom kapacitetu uz pretpostavku mirnog mora i bez vjetra, čv,
$y_i$	vrijednost iz skupa podataka u točki $i$ , -,
$\bar{y}$	prosjeak svih vrijednosti iz skupa podataka, -,
$\alpha$	eksponent pri izračunu $f_{jRoRo}$ , -,
$\beta$	eksponent pri izračunu $f_{jRoRo}$ , -,
$\gamma$	eksponent pri izračunu $f_{jRoRo}$ , -,
$\nabla$	istisnina broda, m <sup>3</sup> ,
$\delta$	eksponent pri izračunu $f_{jRoRo}$ , -,
$\eta_H$	faktor utjecaja trupa, -,
$\eta_R$	korisnost reduktora, -,

$\eta_V$	korisnost vratilnog voda, -,
$\eta_e$	efektivna korisnost motora, -,
$\eta_o$	korisnost propulzora u slobodnoj vožnji, -,
$\eta_{por}$	korisnost porivnog sustava, -,
$\eta_r$	faktor prijelaza, -.
$\sigma$	standardna devijacija,
AP	potencijal acidifikacije, g SO <sub>2eq</sub> /t nm,
EEDI	projektni indeks energetske učinkovitosti, g CO <sub>2</sub> /t nm,
EP	potencijal eutrofikacije, g NO <sub>2eq</sub> /t nm,
GWP	potencijal globalnog zagrijavanja, g CO <sub>2eq</sub> /t nm,
I4E	indeks energetske učinkovitosti i ekološke prihvatljivosti, ekvivalent onečišćenja / t nm.

## POPIS SLIKA

Slika 1 Udio emisije CO <sub>2</sub> na globalnoj razini [4].....	2
Slika 2 Shema konvencionalnog BES-a.....	7
Slika 3 Shema IES-a i HES-a.....	9
Slika 4 Shema HES-a koji nije IES.....	9
Slika 5 Shema IES-a (dizel-električni BES).....	10
Slika 6 Shema IES-a (BES s vratilnim električnim strojem).....	11
Slika 7 Porivni sustav.....	19
Slika 8 Dozvoljene emisije NO <sub>x</sub> spojeve prema fazama ovisno o brzini vrtnje motora [22]...	25
Slika 9 Dozvoljene emisije SO <sub>x</sub> i NO <sub>x</sub> spojeva (za motore čija je brzina vrtnje do 130 o/min) u ovisnosti o području plovidbe u vremenskim intervalima.....	26
Slika 10 Područja kontrolirane emisije štetnih spojeva (ECA) [14].....	26
Slika 11 Grafički prikaz doprinosa pojedinih članova u brojniku <i>Postignutog EEDI</i> -a [14] ..	33
Slika 12 Principijelna i pojednostavljena shema BES-a [17].....	36
Slika 13 Dijagram toka u postupku verifikacije <i>Postignutog EEDI</i> -a.....	38
Slika 14 m/b „Cruise Barcelona“ [51].....	44
Slika 15 m/b „Piana“ [51].....	44
Slika 16 m/t „Zadar“ [51].....	45
Slika 17 HSC „Villum Clausen“ [51].....	45
Slika 18 m/t „Juraj Dalmatinac“ [51].....	46
Slika 19 m/t „Vladimir Nazor“ [51].....	46
Slika 20 m/b „Sveti Marin“ [51].....	47
Slika 21 m/t „Sveti Juraj“ [51].....	47
Slika 22 Grafičko sučelje WROS baze podataka [51].....	51
Slika 23 Azimutni propulzor [55].....	58
Slika 24 Proračunski algoritam za određivanje <i>EEDI referentne krivulje</i> za brodove za sipki teret prema [32].....	83



Slika 25 <i>EEDI referentna krivulja</i> za brodove za sipki teret (prije odbacivanja brodova čiji <i>Procijenjeni EEDI</i> odstupa za više od dvije standardne devijacije) .....	86
Slika 26 <i>EEDI referentna krivulja</i> za brodove za sipki teret (prema uputama iz [32]) .....	86
Slika 27 Proračunski algoritam za određivanje <i>EEDI referentne krivulje</i> za ro-ro putničke brodove prema [34] .....	87
Slika 28 <i>EEDI referentna krivulja</i> za ro-ro putničke brodove (prije odbacivanja brodova čiji <i>Procijenjeni EEDI</i> odstupa za više od dvije standardne devijacije) .....	90
Slika 29 <i>EEDI referentna krivulja</i> za ro-ro putničke brodove (prema uputama iz [34]) .....	91
Slika 30 Proračunski algoritam za <i>EEDI referentnu plohu</i> za ro-ro putničke brodove .....	94
Slika 31 Grafičko sučelje „MATLAB – Surface Fitting Toolbox“ .....	95
Slika 32 <i>EEDI referentna ploha</i> prije korekcije .....	96
Slika 33 <i>EEDI referentna ploha</i> nakon korekcije .....	96
Slika 34 <i>EEDI referentna ploha</i> prije korekcije (kapacitet $f(GT, DWT)$ ) .....	98
Slika 35 <i>EEDI referentna ploha</i> nakon korekcije .....	98
Slika 36 Proračunski algoritam za određivanje $NO_x$ referentne plohe .....	103
Slika 37 $NO_x$ referentna ploha bez korekcije .....	105
Slika 38 $NO_x$ referentna ploha nakon korekcije, izuzimanja brodova čija vrijednost <i>Procijenjenog <math>NO_x</math> Indeksa</i> odstupa za više od dvije standardne devijacije .....	105
Slika 39 $SO_x$ Indeks referentna ploha za ro-ro putničke brodove .....	107
Slika 40 Referentna ploha potencijala globalnog zagrijavanja ro-ro putničkih brodova .....	109
Slika 41 Referentna ploha potencijala acidifikacije ro-ro putničkih brodova .....	109
Slika 42 Referentna ploha potencijala eutrofikacije ro-ro putničkih brodova .....	110
Slika 43 Proračunski algoritam za određivanje <i>I4E referentne plohe</i> .....	110
Slika 44 <i>I4E referentna ploha</i> prije korekcije .....	111
Slika 45 <i>I4E referentna ploha</i> nakon korekcije, izuzimanja brodova čija vrijednost <i>Procijenjenog I4E</i> odstupa za više od dvije standardne devijacije .....	111
Slika 46 IES-i u <i>I4E referentnoj plohi</i> .....	113

## POPIS TABLICA

Tablica 1 SWOT analiza obalne plovidbe u Hrvatskoj [6] .....	5
Tablica 2 Faktori normalizacije za različite emisije i kategorije utjecaja na okoliš [4, 20].....	22
Tablica 3 Utjecajni faktori za različite kategorije utjecaja na okoliš [20, 21].....	23
Tablica 4 Vremenski intervali faza primjene zahtjeva MARPOL-a [22] .....	24
Tablica 5 Vrijednosti parametara za određivanje <i>EEDI referentne krivulje</i> za različite tipove brodova [30] .....	29
Tablica 6 Vrijednosti faktora smanjenja <i>X</i> (u postocima) vrijednosti <i>EEDI referentne krivulje</i> u vremenskim intervalima za različite tipove brodova [30].....	30
Tablica 7 Vrijednosti parametara za određivanje <i>EEDI referentne krivulje</i> za ostale tipove brodova [35] .....	31
Tablica 8 Vrijednosti faktora smanjenja <i>X</i> (u postocima) vrijednosti <i>EEDI referentne krivulje</i> u vremenskim intervalima za dodatne tipove brodova [35] .....	32
Tablica 9 Koeficijent pretvorbe goriva u CO <sub>2</sub> .....	35
Tablica 10 Tehničke značajke brodova prikazanih na slikama.....	48
Tablica 11 Ukupan broj brodova s potrebnim podacima u razdoblju 1998.-2010.....	52
Tablica 12 Broj brodova prema kriterijima u razdoblju 1998.-2010. ....	55
Tablica 13 Ukupan broj brodova s potrebnim podacima u razdoblju 2000.-2015.....	56
Tablica 14 Broj brodova prema kriterijima u razdoblju 2000.-2015. ....	58
Tablica 15 Kategorije inovativnih energetski učinkovitih tehnologija [40] .....	61
Tablica 16 Specifične emisije štetnih spojeva brodskih motora .....	64
Tablica 17 Specifična potrošnja goriva, g/kWh .....	64
Tablica 18 Emisije štetnih spojeva kamionskih motora [20] .....	65
Tablica 19 Specifične emisije štetnih spojeva kamionskih motora.....	65
Tablica 20 Specifične emisije štetnih plinova tijekom faze eksploatacije [21] .....	66
Tablica 21 Specifična ekvivalentna emisija CO <sub>2</sub> fotonaponskih članaka i nuklearnog postrojenja [67] .....	67

Tablica 22 Tehničke karakteristike m/t „Juraj Dalmatinac“ [62] .....	69
Tablica 23 Rezultati proračuna EEDI-a [62].....	69
Tablica 24 Tehničke karakteristike pretpostavljenog IES-a m/t „Juraj Dalmatinac“ [42].....	72
Tablica 25 Ispitni ciklus za motore namijenjene za pogon broda pri konstantnoj brzini vrtnje (dizel-električni BES-i i CPP) [23] .....	74
Tablica 26 Ispitni ciklus za motore namijenjene za pogon broda uz ovisnost brzine vrtnje o opterećenju prema krivulji brodskog propulzora [23].....	74
Tablica 27 Ispitni ciklus za pomoćne motore uz konstantnu brzinu vrtnje [23] .....	74
Tablica 28 Ispitni ciklus za pomoćne motore uz promjenjivu brzinu vrtnje [23] .....	74
Tablica 29 Ispravljeni ispitni ciklus E2 za ro-ro putničke brodove .....	75
Tablica 30 Ispravljeni ispitni ciklus E3 za ro-ro putničke brodove .....	75
Tablica 31 Opterećenje porivnog sustava za konvencionalni BES m/t „Juraj Dalmatinac“....	78
Tablica 32 Opterećenje pomoćnog postrojenja za konvencionalni BES m/t „Juraj Dalmatinac“.....	78
Tablica 33 Proračun EEDI-a za konvencionalni BES m/t „Juraj Dalmatinac“ .....	79
Tablica 34 Energetska bilanca i EEDI za IES m/t „Juraj Dalmatinac“ .....	79
Tablica 35 Specifična potrošnja goriva za ro-ro putničke brodove, g/kWh.....	80
Tablica 36 Rezultati proračuna EEDI referentne krivulje za brodove za sipki teret.....	85
Tablica 37 Rezultati proračuna EEDI referentne krivulje za ro-ro putničke brodove .....	89
Tablica 38 Faktor pretvorbe goriva u SO <sub>2</sub> .....	106
Tablica 39 Referentne vrijednosti za m/t „Juraj Dalmatinac“, 3193 GT .....	112
Tablica 40 Utjecaj na I4E smanjenje od 10% EEDI-a, NO <sub>x</sub> Indeksa i SO <sub>x</sub> Indeksa .....	112
Tablica 41 Vrijednosti prosječnih I4E za ro-ro putničke brodove s IES-om .....	114

# 1. UVOD

## 1.1. Značaj energetske učinkovitosti i ekološke prihvatljivosti

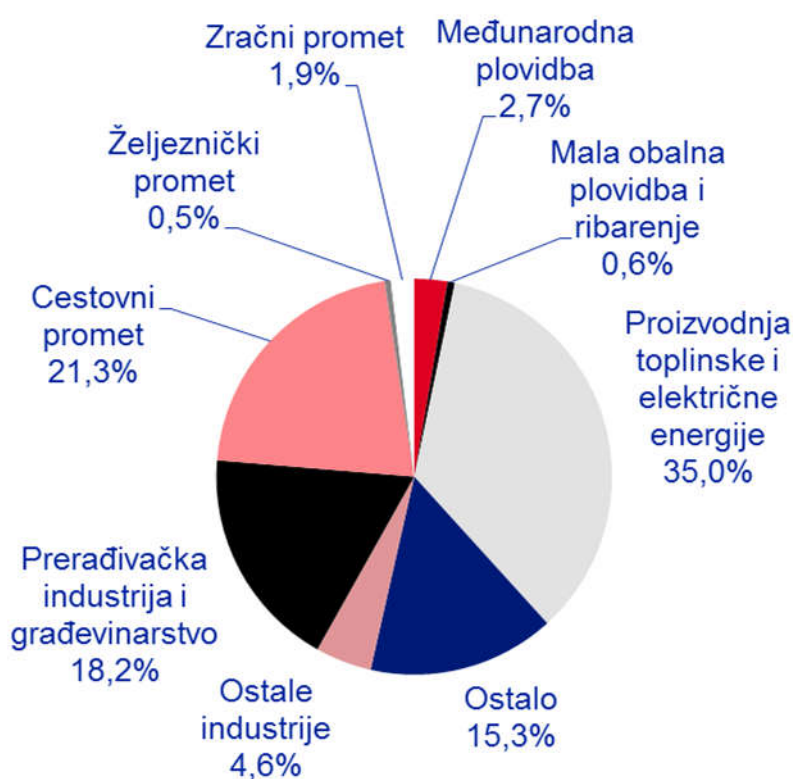
Povijest je pokazala da je razvoj brodskog prometa jedan od ključnih preduvjeta za gospodarski razvoj. To je prepoznala i Europska komisija [1] kojoj je održivi razvoj brodskog prometa od posebnog interesa. Morem se prevozi 80% dobara u svijetu. Obalnom plovidbom (*Short Sea Shipping* - SSS) svake godine unutar EU preveze se 40% tereta i više od 400 milijuna putnika što ima itekako veliki utjecaj na život građana EU. Rastom globalne ekonomije raste i potreba za brodskim prijevozom tereta. Jedan od strateških interesa EU je održivi razvoj stabilne, predvidive i globalno konkurentne brodograđevne i pomorske (brodarske) industrije. Posebno važno mjesto u tim nastojanjima zauzima razvoj infrastrukture riječnog prometa [2]. Unutarnja plovidba (rijeke i jezera) ima veliki transportni potencijal, prihvatljive je pouzdanosti i manjeg utjecaja na okoliš u usporedbi s cestovnim transportom.

Energetska učinkovitost i ekološka prihvatljivost postaje sve bitnijim elementom u svakoj, pa tako i u brodarskoj industriji. Energetska učinkovitost broda je relativni odnos utrošene energije i gospodarskog ekvivalenta kojega brod mora ostvariti u eksploataciji, dok ekološka prihvatljivost je širi pojam i obuhvaća integralni utjecaj broda na okoliš. Međunarodni sporazumi o mjerama za zaštitu okoliša, fluktuirajuća, ali ipak stalno rastuća cijena goriva (koja ima bitnu ulogu u eksploatacijskim troškovima broda), kao i razvoj alternativnih izvora energije dovode u pitanje održivost standardnih projektnih rješenja brodskog energetskog sustava (BES). Održivi razvoj brodarske industrije podrazumijeva, među ostalim, razvoj i primjenu inovativnih energetski učinkovitih i ekološki prihvatljivih tehnologija i koncepata u osnivanju suvremenih BES-a.

Tradicionalni pristup analizi BES-a razlikuje glavni (porivni) sustav i pomoćno postrojenje. Glavni (porivni) stroj (eng. *main engine*), tipično sporokretni dvotaktni dizelski motor, je izravno spojen na brodski vijak, dok pomoćno postrojenje, tipično dizelski agregati (eng. *auxiliary engine*) ili, rjeđe, turbo-generatori, proizvodi električnu energiju. Suvremena rješenja u razvoju BES-a idu u smjeru razvoja integriranih energetskih sustava (IES), čija je glavna značajka korištenje prvopokretača za centraliziranu proizvodnju ukupno potrebne količine električne energije, i primjena elektromotornih propulzijskih sustava. Pojam prvopokretač (lat. *primum movens*, eng. *prime mover*) obuhvaća strojeve i uređaje korištene za pretvorbu primarnog oblika energije (iz goriva ili obnovljivih izvora energije) u mehaničku ili električnu energiju, kao npr. motori s unutarnjim izgaranjem, plinske i parne turbine,

gorivni članci, vjetroturbine itd. Primjenom IES-a postiže se ukupno veća energetska učinkovitost i ekološka prihvatljivost BES-a definirana sukladno propisima međunarodnih organizacija za zaštitu okoliša [3].

U eksploatacijskim uvjetima od posebne su važnosti kontrola i smanjenje emisije štetnih tvari, i to stakleničkih plinova (primarno CO<sub>2</sub> i CH<sub>4</sub>), NO<sub>x</sub> i SO<sub>x</sub> spojeva, te krutih čestica. Opsežna studija [4] je provedena kako bi se odredile globalne emisije štetnih plinova i predvidio njihov rast, a na temelju te studije provedena je i slična studija za EU [5]. Procjenjuje se da je u 2007. godini brodski promet odgovoran za emisiju nešto više od milijardu tona CO<sub>2</sub>, što na globalnoj razini iznosi oko 3,3%, Slika 1.



Slika 1 Udio emisije CO<sub>2</sub> na globalnoj razini [4]

Za najveći dio te emisije, oko 870 milijuna tona, je odgovoran međunarodni brodski promet (između luka različitih država). No, potrebno je posebno istaknuti i obalnu plovidbu. Naime, brodovi koji plove duž obala i u zatvorenim morima najviše onečišćuju akvatorije luka što ima posebno negativan utjecaj na opće zdravlje ljudi koji žive u tim područjima [6].

Osim emisije CO<sub>2</sub>, brodski je promet u 2007. odgovoran i za emisiju oko 25 milijuna tona NO<sub>x</sub> i 15 milijuna tona SO<sub>x</sub> spojeva. Nije zanemariva ni emisija krutih čestica manjih od 10

mikrometara (PM<sub>10</sub>) koja iznosi za tu godinu oko 1,8 milijuna tona. Ti podaci prikazuju emisije štetnih tvari samo kod brodova u službi. No, brod utječe na okoliš kroz svoj cijeli životni vijek od početka gradnje, u službi, pa i nakon otpuštanja iz službe. Ipak, studija cjeloživotnog utjecaja broda na okoliš [7] pokazuje da brod proizvodi najviše CO<sub>2</sub> upravo tijekom službe, i to oko 96,9%. Korištenjem novih tehnologija i materijala taj se udio može smanjiti i do 90% [8], međutim i ti podaci pokazuju da je rad BES-a primarni izvor emisije CO<sub>2</sub>.

Iako postoje kemijski spojevi s mnogo većim globalnim potencijalom zagrijavanja (eng. *Global Warming Potential* – GWP), CO<sub>2</sub> se smatra najznačajnijim stakleničkim plinom [4]. Proces globalnog zatopljenja se ne može jednoznačno predvidjeti, kao što se ne mogu predvidjeti niti emisije štetnih plinova u budućnosti [4, 9, 10]. Kao granica je postavljen globalni porast temperature od 2 °C do 2100. godine. Ako se ne donesu nikakve nove regulative, procijenjena je vjerojatnost od 50% da se ta granica neće prijeći [4, 10].

S druge strane, zahtjevi za smanjenje emisija CO<sub>2</sub> su opširno obrazloženi u [11]. Navedene su stope smanjenja emisije u različitim scenarijima koje se moraju postići u različitim segmentima kako bi se postigla željena prosječna razina koncentracije CO<sub>2</sub> u atmosferi. Međutim, ne postoji jasno definirana veza između stabilizacije globalne temperature i zahtjeva za održanje prosječne razine koncentracije CO<sub>2</sub> u atmosferi. Pretpostavka je da za globalni porast temperature od 2 °C do 2100. godine, u odnosu na razdoblje prije industrijalizacije, prosječna razina CO<sub>2</sub> u atmosferi ne smije prijeći 550 ppm [12]. Za to je potrebna stopa promjene emisije CO<sub>2</sub> na svjetskoj razini između -1,01 i +0,62%/godišnje. U [13] je procijenjen rast godišnje emisije CO<sub>2</sub> flote brodova za sipki teret za 410% u razdoblju od 2020. do 2040. godine, tj. na godišnjoj razini od 20,5%, u slučaju da se ne primjenjuje nikakva regulativa. Ta je procjena temeljena na rastu potražnje za prijevozom tereta te pokazuje jasnu potrebu za reguliranjem emisija štetnih plinova s brodova.

Za Republiku Hrvatsku energetska učinkovitost i ekološka prihvatljivost brodova ima posebnu važnost. Republika Hrvatska ima 6 278 km morske obale te 576 obalnih naselja s gotovo milijun stanovnika. Iako se Hrvatska često predstavlja kao pomorska zemlja, nema odgovarajuće povezanosti između obalnih zajednica na kopnu i otoka linijskim pomorskim prijevozom. Prije 50-ak godina takav servis je ustupio mjesto cestovnom prijevozu. Trajekti se trenutno koriste primarno kao sredstvo transporta vozila preko kanala koji onemogućuju cestovnu infrastrukturu, pri tom iščekujući izgradnju mostova.

Razlozi ukidanja pomorskih veza su bili njihova mala profitabilnost kao i sve veća izgradnja magistralnih cesta i autocesta. U posljednje vrijeme, zbog sve većeg onečišćenja zraka, povećanih troškova održavanja cesta, kao i sve veće gužve u povijesnim jezgrama obalnih gradova, obalna plovidba se ponovno javlja kao „održiva“ alternativa. Održivi prijevoz je onaj koji omogućava na siguran način pojedincima i društvu zadovoljavanje temeljnih potreba pristupa bez narušavanja zdravlja ljudi i ekosustava. Nadalje, unutargeneracijski i međugeneracijski treba biti pravedan, troškovno prihvatljiv i funkcionirati učinkovito nudeći mogućnost odabira načina prijevoza. Također je važno da podupire gospodarsku aktivnost, ograničava ispuštanje štetnih tvari u mjeri koju okoliš može apsorbirati, minimizira potrošnju neobnovljivih izvora energije do razine održivog iskorištavanja, ponovno koristi i oporabljuje njihove sastojke, a korištenje zemljišta i stvaranje buke svodi na najmanju moguću mjeru [6].

Europska komisija nastoji oživjeti upravo obalnu plovidbu kao novi, alternativni i održivi način prijevoza. Uspješan program male obalne plovidbe pruža mogućnost dodatka vrijednosti za domaću i međunarodnu mrežu prijevoza, kao i povećanje ekonomske djelotvornosti i životnog standarda društva. A Hrvatska, zbog uvučenosti sjevernog dijela Jadrana u Europsko kopno, ima ogroman potencijal za razvoj ovoga sektora. Međutim Hrvatska nedovoljno štiti vlastite interese održivosti i zaštite okoliša u okviru globalnih razvojnih projekata, a interesu građana, prirode ili općem javnom interesu se ne pridaje ni dužna pažnje niti prvenstvo. Tablica 1 prikazuje SWOT (eng. *Strength-Weaknesses-Opportunities-Threats*) studiju za strategiju razvoja obalne plovidbe u Hrvatskoj [6].

Tablica 1 SWOT analiza obalne plovidbe u Hrvatskoj [6]

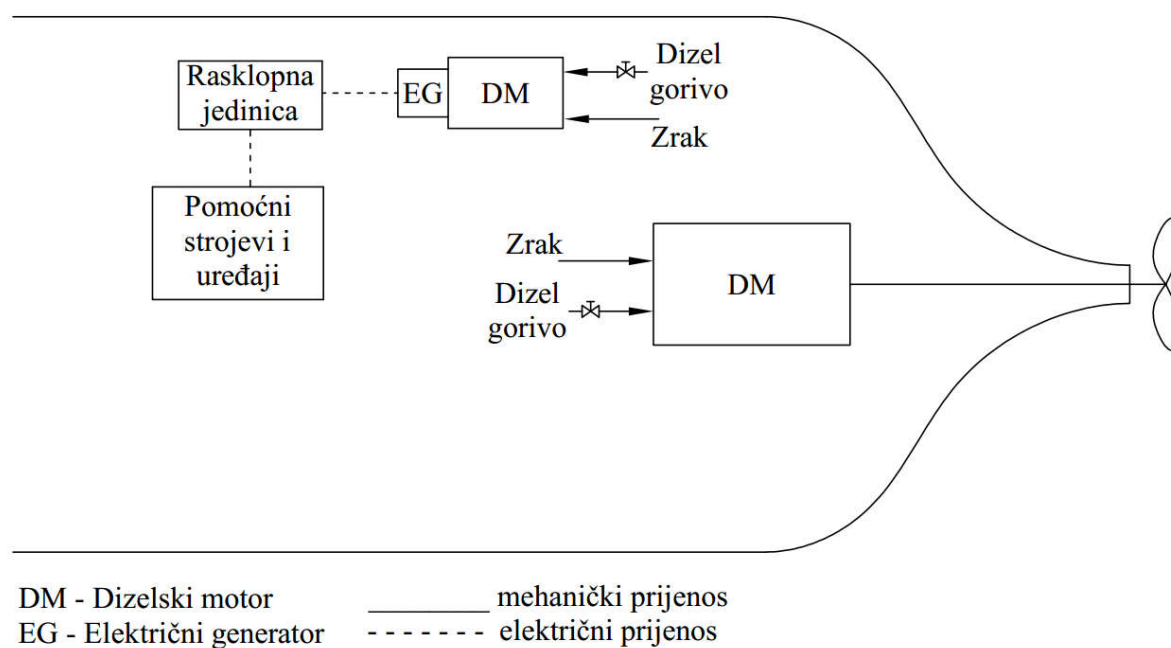
<ul style="list-style-type: none"> <li>• zemljopisna predisponiranost</li> <li>• gustoća obalnog stanovništva i turisti</li> <li>• orijentiranost zajednica prema moru</li> <li>• povijesne luke u središtima gradova</li> <li>• manje korištenje netaknutog tla u usporedbi sa cestama i manja potreba nepropusnim površinama, zajednice izbjegavaju presijecanje cestama</li> <li>• izbjegavanje gužvi na cestama</li> <li>• manja cestovna buka</li> <li>• manji javni izdaci za infrastrukturu</li> <li>• veća sigurnost u odnosu na druge oblike prijevoza</li> <li>• servis za putnike i teret</li> <li>• lakša prilagodba kolebanjima u prometu</li> <li>• intermodalna integracija i dodana vrijednost za domaću i međunarodnu mrežu prijevoza</li> <li>• raspoloživa znanja u brodarstvu</li> <li>• oživotvorenje energetske učinkovitosti u energetske krizi</li> <li>• oživljavanje pomorske industrije</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• neprimjerena povezanost obalnih naselja na kopnu i otocima javnim prijevozom – niska pokrivenost, učestalost, mali broj luka uplovljavanja, prevladavaju trajekti,</li> <li>• gašenje vlastite brodograđevne industrije</li> <li>• administrativne i organizacijske slabosti</li> <li>• podiskorištenost luka</li> <li>• stari brodovi s visokim emisijama</li> <li>• potreba za većim brojem novih malih brodova i pristupnim čvorovima</li> <li>• naglasak na financiranje i poticanje cestovnog prijevoza</li> <li>• zanemarivanje male obalne plovidbe i željezničkog prijevoza u politici prijevoza</li> <li>• loše definirana nacionalna pomorska strategija</li> <li>• nedostatne pregovaračke sposobnosti i vještine</li> <li>• dugotrajnost postupaka na granicama</li> <li>• onečišćenje zraka sumpornim dioksidom, dušičnim oksidima, čađom</li> <li>• EEDI nije još razvijen za putničke brodove i primjenjuje se samo na brodove veće od 400 GT</li> </ul>
<b>Snage - unutarnji pozitivni činitelji</b>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="background-color: #0000FF; color: white; padding: 10px; text-align: center;"><b>S</b></div> <div style="background-color: #FFFF00; color: black; padding: 10px; text-align: center;"><b>W</b></div> </div>
<b>Prilike - vanjski pozitivni činitelji</b>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="background-color: #FF00FF; color: white; padding: 10px; text-align: center;"><b>O</b></div> <div style="background-color: #00FF00; color: black; padding: 10px; text-align: center;"><b>T</b></div> </div>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• bolja integriranost otoka u pogledu obrazovanja, zdravlja, tržišta za vlastite poljoprivredne i druge proizvode</li> <li>• manja depopulacija otoka, bolji životni standard</li> <li>• revitalizacija obalnih gradova</li> <li>• suočavanje s energetsom krizom</li> <li>• ulaganje u stvaranje novih radnih mjesta</li> <li>• cjelogodišnja gospodarska aktivnost duž obale i na otocima</li> <li>• očuvanje/oživljavanje brodograđevnih vještina</li> <li>• održavanje tradicije</li> <li>• omogućavanje posjetiteljima da se upoznaju s otočnom baštinom</li> <li>• izvoz brodova i znanja</li> <li>• zelena inovacija, informatička inovacija</li> <li>• razvoj tehnologija suzbijanja onečišćenja zraka</li> <li>• korištenje sučeve energije za obalne izvore napajanja na vezu</li> <li>• razvijanje morskog prostornog planiranja</li> <li>• doprinosu prometu u sektoru osiguranja, posredništva i transporta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• geopolitički interesi</li> <li>• nepovoljno domaće i europsko zakonodavstvo, trgovinski sporazumi</li> <li>• uvjeti javne nabave</li> <li>• naglasak na veće projekte male obalne plovidbe</li> <li>• temeljenje usluge prijevoza isključivo na ekonomskim kriterijima</li> <li>• nekontrolirani razvoj</li> <li>• promet u osjetljivim područjima</li> <li>• neregulirane luke (luke kao sučelja između mora i kopna su ključne za ekosustave)</li> <li>• turizam ukoliko ne podliježe primjerenom uređivanju i kontroli</li> <li>• učinak odvratanja zbog područja kontrolirane emisije</li> </ul>



Iz studije se može zaključiti da je slabosti i prijetnje moguće pretvoriti u snagu i mogućnosti te ih svesti na najmanju moguću mjeru ili izbjeći, pod uvjetom da se naglasak u donošenju politika s ciljem zaštite okoliša stavi na šire javne, ekonomske i ekološke interese. Najveća prijetnja dolazi od vlastitih nedostatnih organizacijskih kapaciteta i nepovoljnih sporazuma iz međunarodnih pregovora. Na brodove, luke i postupke u pomorstvu treba primjenjivati stroge propise o zaštiti okoliša, a usprkos sadašnjem smanjivanju kapaciteta velikih brodogradilišta, potrebno je očuvati vlastite brodograđevne i inovacijske vještine. Poseban je naglasak potrebno staviti na ulaganje u domaća akademska i tehnička znanja za povećanje ekološke prihvatljivosti – „ozelenjavanje“ broderske industrije općenito i posebno male obalne plovidbe. Jedan od načina „ozelenjavanja“ broderske industrije je korištenje energetski učinkovitijih i ekološki prihvatljivijih BES-a, poput IES-a.

## 1.2. Integrirani energetska sustavi

Glavna značajka konvencionalnih BES-a je jasna podjela na glavno i pomoćno energetska postrojenje. Glavno postrojenje snabdijeva energetska potreba porivnog sustava broda, dok pomoćno postrojenje snabdijeva električnom energijom glavno postrojenje, kao i sve druge potrošače na brodu. Glavno postrojenje na brodu se sastoji od glavnog stroja (eng. *main engine*), prijenosnika energije te propulzora, dok se pomoćno postrojenje sastoji od pomoćnog stroja (eng. *auxiliary engine*) najčešće izravno spojenog na generator električne energije, Slika 2.



Slika 2 Shema konvencionalnog BES-a

Trenutno najčešće korišteni prvopokretači u BES-i su dizelski motori [14]. Dosadašnje iskustvo u eksploataciji pokazuje da su veoma pouzdani i energetska povoljni izvori energije, kako za propulziju tako i za proizvodnju pomoćne energije na brodu. Njihova tehnologija je dobro poznata, proizvođači imaju dobro razgranatu mrežu servisa i rezervnih dijelova, a i pomorski strojari su dobro upoznati s radom i održavanjem dizelskih motora. Prilagođeni su za rad na teško dizelsko gorivo (eng. *Heavy Fuel Oil* - HFO) koje je moguće jeftino nabaviti širom svijeta jer je i mreža dobavljača goriva dobro razvijena.

Nasuprot tome, glavna značajka IES-a je korištenje prvopokretača za centraliziranu proizvodnju ukupno potrebne količine električne energije, i primjena elektromotornih propulzijskih sustava. IES-i su nedvojbeno kompleksniji od klasičnih BES-a, no omogućuju

povezivanje različitih prvopokretača i potrošača u jedan sustav. Glavne prednosti takvoga sustava su [15]:

- povećana energetska učinkovitost,
- povećana ukupna raspoloživa snaga za pojedine sustave,
- povećana pouzdanost.

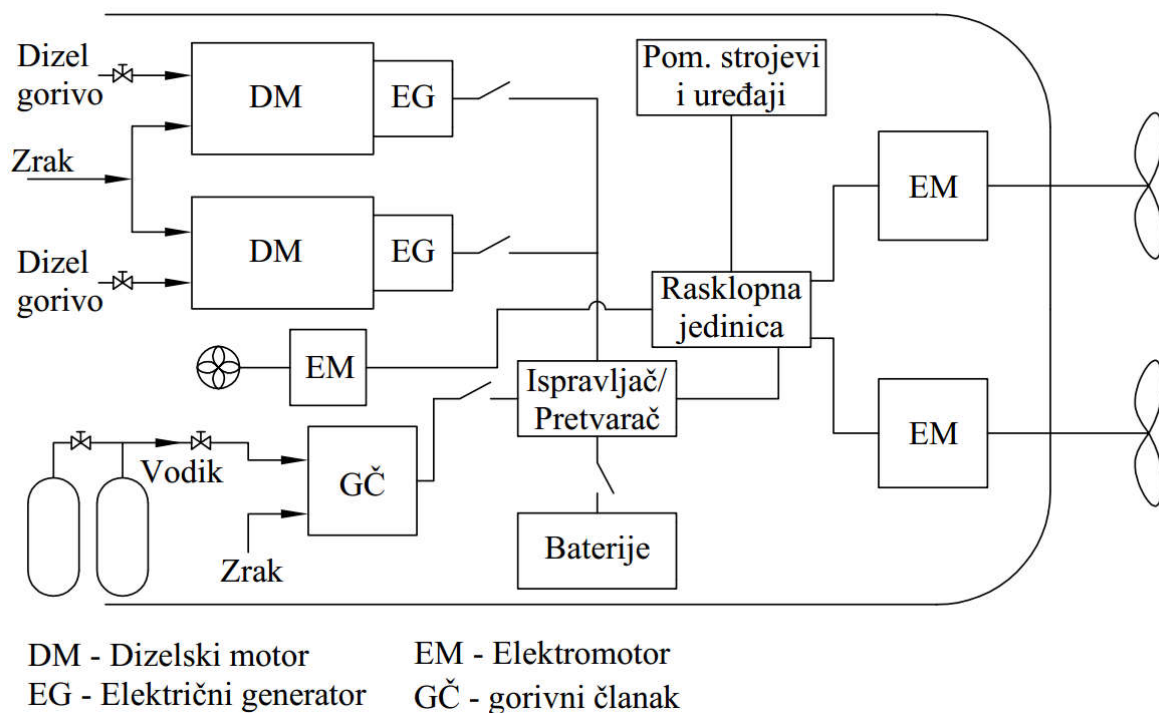
Također nije zanemariva niti veća sloboda koju imaju projektanti brodske strojarne u raspoređivanju strojeva i uređaja jer više nije nužno da glavni stroj bude što bliže krmi broda. To daje također mogućnost optimizacije rasporeda tereta na brodu što u konačnici može poboljšati eksploatacijske značajke broda – bilo kroz poboljšana hidrodinamička svojstva (smanjen otpor), bilo kroz povećanje kapaciteta broda, bolji stabilitet, povoljniji moment savijanja, itd.

Treba razlikovati IES-e i hibridne energetske sustave (HES). Prema shvaćanju [16] i primjeni u automobilske industrije HES-i su svi sustavi koji imaju više raznovrsnih strojeva i/ili uređaja. Tako se mogu razlikovati serijski, paralelni ili serijsko-paralelni HES-i. Međutim, ovakva definicija nije primjenjiva u brodstrojarstvu, a ni uopće u sustavima koji imaju više izvora energije i potrošača. Naime, strogim shvaćanjem navedene definicije, već bi i konvencionalni BES-i bili smatrani hibridnima, jer uz glavni dizelski motor sadrže redovito i dizelski agregat za proizvodnju električne energije.

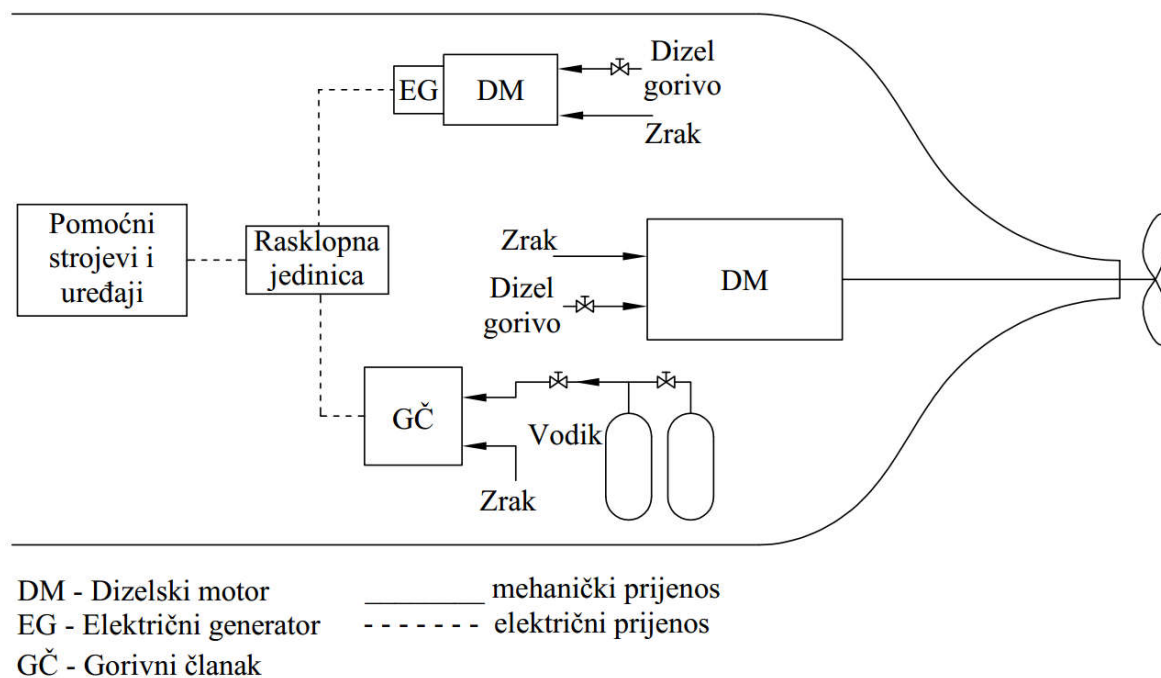
Brodske IES-i su se tek nedavno počeli javljati kao alternativa konvencionalnim BES-ima tako da još nije u potpunosti niti razrađena niti usvojena terminologija. U sklopu ovoga doktorata bit će korištene sljedeće definicije IES-a i HES-a:

- IES-i su BES-i u kojima su prvopokretači i potrošači integrirani u jedan sustav,
- HES-i su BES-i koji koriste više raznovrsnih prvopokretača (različitoga tipa).

Iz ovakvih definicija HES-a i IES-a vidljivo je da brod može imati IES koji je i HES, Slika 3, međutim može imati IES koji nije HES, tj. koji koristi samo dizelske motore kao prvopokretače. Također postoji mogućnost da brod ima HES koji nije IES, tj. da koristi raznovrsne prvopokretače, no nema ih integrirane u jedan sustav, Slika 4, iako su takve izvedbe rijetke. Mogućnosti koje nude IES-i i HES-i su veoma široke i uvode novu paradigmatu u proces projektiranja BES-a izbacujući konvencionalne BES-e kao neprikosnoveno rješenje.



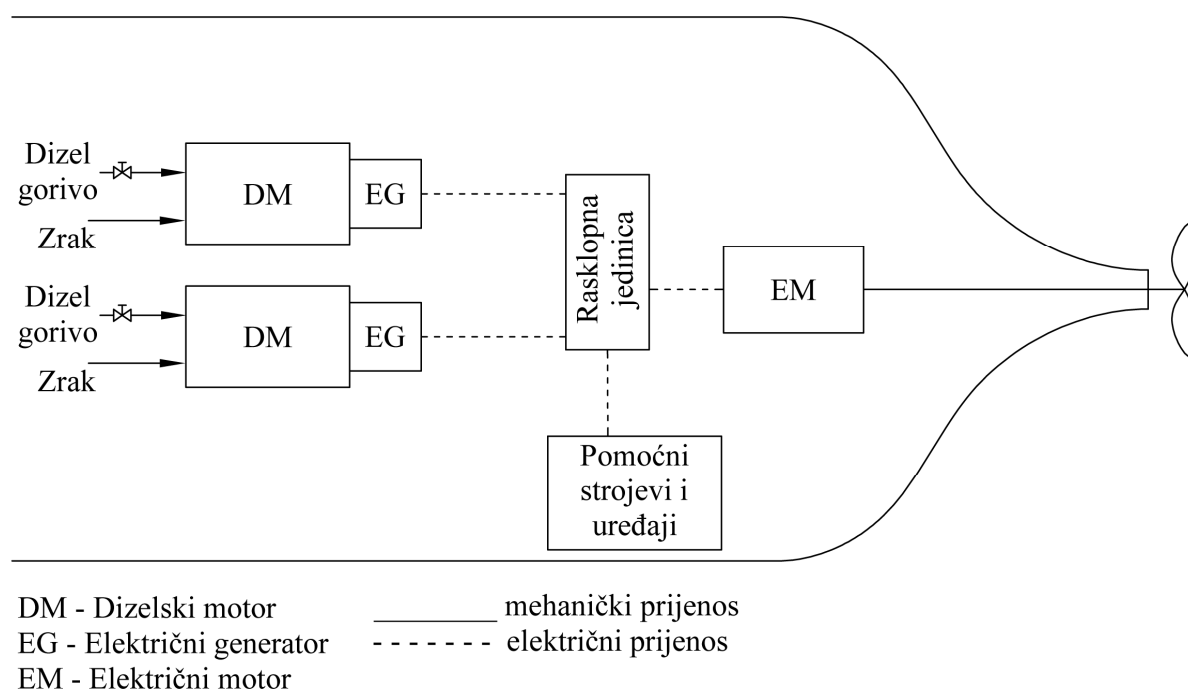
Slika 3 Shema IES-a i HES-a



Slika 4 Shema HES-a koji nije IES

Jedna od tipičnih konfiguracija IES-a, posebice za ro-ro putničke brodove, je „dizel-električni“ sustav, Slika 5. U automobilske industriji takav je sustav poznat kao serijski HES [16]. Takve izvedbe se susreću u BES-ima kod kojih je prvopokretač (najčešće srednjokretni

dizelski motor) izravno spojen na generator električne energije koji proizvodi električnu energiju kojom se pogoni elektromotor koji je izravno ili češće preko reduktora spojen na brodski propulzor. Ovakva konfiguracija omogućava rad motora u optimalnoj radnoj točki neovisno o opterećenju čime se povećava njegova korisnost i smanjuje potrošnja goriva, a time i emisija štetnih spojeva. Također u ovakvom sustavu prvopokretač više ne mora biti smještan na krmi blizu propulzora već može biti smješten bilo gdje na brodu.



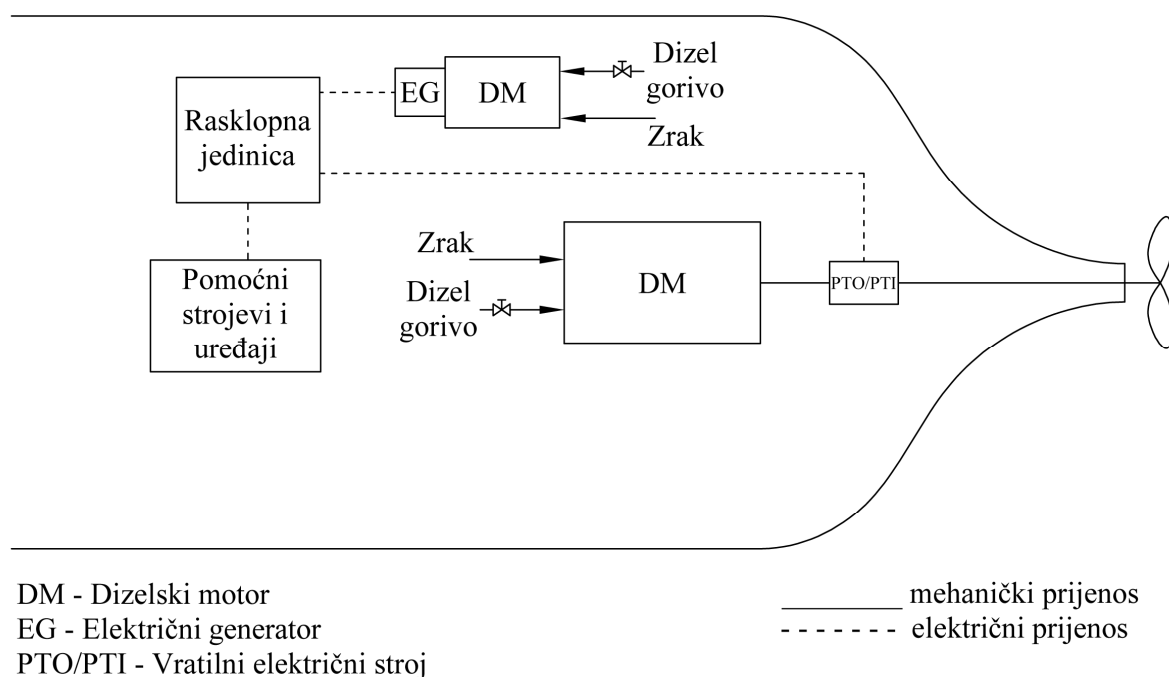
Slika 5 Shema IES-a (dizel-električni BES)

Korištenjem baterija sveukupna korisnost ovakvog sustava se može još i dodatno povećati jer baterije omogućavaju potpuno isključivanje motora pri malim opterećenjima. Međutim, dio energije se gubi prilikom pretvorbe mehaničke energije u električnu (zbog gubitaka u generatoru) i ponovno u mehaničku (zbog gubitaka u elektromotoru) jer ne postoji mehanička veza između prvopokretača i propulzora. Zbog toga je ovakav sustav prikladniji kod brodova koji često borave luci ili plove malim brzinama.

Kao druga tipična izvedba IES-a je sustav poznat kao PTO/PTI (eng. *Power Take Off/Power Take In*) sustav. U pomorskoj praksi ovakav se sustav iskrivljeno naziva sustav s osovinskim generatorom. Ispravnije je nazvati ga sustav s vratilnim električnim strojem, Slika 6, jer se u toj konfiguraciji na vratilnom (a ne osovinskom) vođu nalazi električni stroj (koji može raditi u generatorskom ili motornom režimu) U automobilskoj industriji ovakav je sustav poznat kao paralelni HES [16]. U tom su slučaju i prvopokretač i električni stroj mehanički spojeni s

potrošačem, tipično preko za to predviđenih reduktora. Na taj način potrošač može biti pokretan ili pomoću prvopokretača ili pomoću električnog stroja ili pomoću obadva istovremeno. Uz primjenu baterija ovakav sustav omogućava brojne kombinacije pri različitim opterećenjima: u automobilima se tipično pri manjim opterećenjima za pogon koristi samo električni stroj kao elektromotor (zbog bolje korisnosti), a pri većim opterećenjima samo dizelski (ili benzinski) motor, dok se električni stroj koristi kao generator električne energije.

U brodovima ovakva je konfiguracija prvenstveno namijenjena za poboljšanje radnih značajki porivnog sustava. To se ostvaruje na način da se momentom od vrtilnog električnog stroja u kombinaciji s momentom od propulzora tereti glavni motor na način da on radi što bliže optimalnoj radnoj točki. Također nije zanemarivo da se za proizvodnju električne energije za pomoćne potrebe na brodu vrtilnim generatorom pokretanim glavnim motorom troši nešto manje goriva jer je specifična potrošnja glavnih motora obično nešto niža od pomoćnih. Ovakva se izvedba koristi u pravilu u izvedbi s brodskim vijkom s upravljivim usponom (eng. *Controllable Pitch Propeller – CPP*) kako bi se osigurala konstantna brzina vrtnje motora i generatora električne energije, a time i konstantna frekvencija u električnoj mreži.



Slika 6 Shema IES-a (BES s vrtilnim električnim strojem)

Ovakav sustav se koristi ponekad na velikim trgovačkim brodovima (posebno kontejnerskim) koji imaju veliku instaliranu snagu glavnih motora (>50 MW), ali i kod drugih brodova.

Sustav omogućava korištenje vratilnog električnog stroja i kao vratilnog elektromotora, međutim taj se elektromotor onda primarno koristi kao pomoć glavnom motoru, a veoma rijetko se brod isključivo pogoni tim elektromotorom. Naime, instalirana snaga vratilnog generatora je često za jedan do dva reda veličine manja od instalirane snage glavnog motora pa njegovo korištenje kao vratilnog elektromotora ne bi imalo velikog utjecaja na propulzijske značajke broda. K tome, snaga za vratilni elektromotor u tom slučaju bi bila proizvedena od pomoćnih dizelskih motora čija je specifična potrošnja goriva bitno veća te bi to onda bilo ekonomski neisplativo. Također, brodovi velikih instaliranih snaga najčešće nemaju uključno-isključnu spojku u porivnom sustavu pa stoga nije moguće pri malim brzinama plovidbe iskopčati glavni motor i ploviti koristeći isključivo vratilni elektromotor.

Ovakva izvedba koristi se i kod manjih brodova, posebice radnih i ribarskih. U tom je slučaju prvopokretač najčešće brzokretni dizelski motor koji je preko reduktora spojen s propulzorom, dok je na reduktor spojen i električni stroj. Unutar reduktora se nalaze spojke koje uključuju ili isključuju električni stroj i propulzor. Svrha toga je da brod u uvjetima kada plovi malim brzinama ili stoji, a ima značajne potrebe za električnom energijom, tu električnu energiju proizvodi električnim strojem pokretanim od glavnog dizelskog motora.

Ovakve „nekonvencionalne“ konfiguracije BES-a doprinose povećanju energetske učinkovitosti i ekološke prihvatljivosti broda. Međutim, sadašnji pristup ocjeni energetske učinkovitosti i ekološke prihvatljivosti BES-a, kroz proračunski algoritam prema međunarodno važećoj regulativi donesenoj od strane Odbora za zaštitu pomorskog okoliša (eng. „*Marine Environment Protection Committee*“ – MEPC) prema Rezoluciji MEPC.212(63), temelji se na direktnoj vezi između količine potrošnje goriva (ugljikovodika) i ekvivalentne emisije CO<sub>2</sub> po unaprijed definiranoj jedinici gospodarskog učina [17]. Kod IES-a zbog njihove složenosti i različitosti primarnih izvora energije, a time i vrsta goriva, veza između količine utrošenog goriva i ekvivalenta utjecaja na okoliš po jedinici gospodarskog učina je složenija. Stoga sadašnji pristup nije moguće primijeniti na IES-ima.

## 2. CILJ ISTRAŽIVANJA

Iz uvodnog izlaganja zaključuje se da suvremena rješenja u razvoju brodskih energetske sustava (BES) idu u smjeru razvoja integriranih energetske sustava (IES), čija je glavna značajka korištenje prvopokretača (motora s unutarnjim izgaranjem, plinskih i parnih turbina, gorivnih članaka, baterija, vjetroturbina itd.) za centraliziranu proizvodnju sveukupno potrebne količine električne energije uz primjenu elektromotornih propulzijskih sustava. Time se postiže veća energetska učinkovitost, a primjenom ukapljenog prirodnog plina (LNG) kao goriva za prvopokretače i ekološka prihvatljivost BES-a, sukladno propisima međunarodnih organizacija za zaštitu okoliša.

Međutim, sadašnji se pristup ocjeni energetske učinkovitosti i ekološke prihvatljivosti BES-a temelji na direktnoj vezi između količine potrošnje goriva (ugljikovodika) i ekvivalentne emisije CO<sub>2</sub> po unaprijed definiranoj jedinici gospodarskog učina [17]. Kao što je već istaknuto, kod IES-a veza između količine utrošenog goriva i ekvivalenta utjecaja na okoliš po jedinici gospodarskog učina je složenija. Kako bi se postigao napredak u povećanju korisnosti BES-a i smanjenju emisije štetnih tvari, potreban je cjeloviti (integralni, holistički) pristup analizi BES-a kao tehničkog sustava. On mora obuhvaćati sve elemente brodstrojarstva, elektrostrojarstva, brodogradnje, kao i iskustva i prakse pomoraca. Štoviše, kako bi se moglo kvalitetno usporediti mogućnosti, te odrediti optimalno i održivo rješenje, u obzir se moraju uzeti svi sudionici u cijelom životnom vijeku broda. Pri analizi suvremenih BES-a nije dovoljno promatrati samo eksploataciju broda jer, iako mnoge inovativne tehnologije u eksploataciji ne proizvode štetne spojeve, ne može se reći da u proizvodnji i reciklaži te tehnologije ne utječu na okoliš. Stoga je od izuzetne važnosti procijeniti cjeloživotni utjecaj na okoliš BES-a, kako u eksploataciji, tako i u gradnji i uporabi, kako ne bi zbog smanjenja emisija u jednom razdoblju (eksploataciji) došlo do (možda i većeg) povećanja emisija u drugom razdoblju (proizvodnji i reciklaži).



Stoga je cilj ovoga istraživanja analiza energetske i ekološke značajke brodskih integriranih energetske sustava (IES) i njihove međusobne povezanosti sa svrhom ocjene doprinosa različitih konfiguracija BES-a ukupnoj energetske učinkovitosti i ekološkoj prihvatljivosti broda. Ovaj cilj će biti ispunjen kroz dokazivanje sljedećih hipoteza:

1. povećanje energetske učinkovitosti brodskog energetske sustava (BES) ne vodi nužno povećanju njegove ekološke prihvatljivosti, kao ni obratno,
2. postojeći algoritam za ocjenu energetske učinkovitosti broda moguće je unaprijediti kako bi se mogao primijeniti na različite konfiguracije BES-a, uključujući i IES-e,
3. primjenom IES-a moguće je povećati energetske učinkovitost i ekološku prihvatljivost broda.

## **2.1. Metodologija i plan istraživanja**

Kako bi se potvrdila prva hipoteza doktorskog rada, potrebno je najprije definirati pojmove energetske učinkovitosti i ekološke prihvatljivosti, što je i dano u poglavlju 3. Na temelju tih definicija bit će naglašene razlike u pojmovima te potvrđeno kako povećanje energetske učinkovitosti BES-a ne vodi nužno povećanju njegove ekološke prihvatljivosti, kao ni obratno.

Kako bi se mogla potvrditi i druga hipoteza, potrebno je najprije analizirati sadašnji pristup ocjeni energetske učinkovitosti brodova kako bi se jasno definirali razlozi zbog kojih sadašnji pristup nije primjenjiv na IES-e. Također će se pristupiti analizi suvremenih pravaca razvoja inovativnih metoda i modela za određivanje indeksa energetske učinkovitosti broda predloženih u literaturi, kao i istraživanju razvoja novih pristupa. To uključuje usporednu analizu utjecaja različitih faktora na energetske učinkovitost BES-a, kako je i prikazano u poglavlju 4.1. Na temelju tih analiza izradit će se novi model za ocjenu energetske učinkovitosti broda koji je univerzalno primjenjiv za pojedine tipove brodova. Kako bi se potvrdila valjanost tog pristupa, bit će potrebno primijeniti taj pristup na postojeću svjetsku flotu brodova. Za to je najprije potrebno dati pregled tehničkih (poglavlje 4.2.1) te energetskih i ekoloških značajki (poglavlje 4.2.2) postojeće flote brodova. Pregled će biti ograničen na ro-ro putničke brodove jer se upravo za te tipove brodova sadašnji pristup pokazao najmanje primjenjiv. Projektni kriteriji za te tipove brodova imaju veliku mogućnost variranja što rezultira i velikim varijacijama u konfiguracijama BES-a. Stoga će ro-ro putnički brodovi najprije biti sistematizirani prema kapacitetu, ukupnoj snazi BES-a, vrsti prvopokretača, vrsti propulzijskog sustava i dr. Podaci o tim brodovima i njihovim BES-ima će biti prikupljeni kroz „World Register of Ships“ (WROS) bazu podataka. Ta baza podataka sadrži najopsežnije tehničke podatke o svim brodovima u svjetskoj floti. U sklopu sistematizacije izradit će se vlastita baza podataka prilagođena za korištenje unutar ovog istraživanja. Na temelju zaključaka analize i uočenih nedostataka trenutnog pristupa ocjeni energetske učinkovitosti, predložit će se novi pristup definiranja energetske učinkovitosti broda (poglavlje 4.3) koji je primjenjiv i na IES-e. Korištenjem izrađene vlastite baze podataka novi pristup će se primijeniti na postojeću flotu ro-ro putničkih brodova (poglavlje 4.4). Kako bi se provjerila točnost izrađene baze podataka, nužno ju je prethodno ispitati na temelju postojećih modela i provjerom s rezultatima dostupnima u literaturi. To će se provesti za brodove za sipki teret i za ro-ro putničke brodove.

Kako bi se mogla potvrditi treća hipoteza ovoga doktorskog rada, potrebno je najprije definirati Indeks energetske učinkovitosti i ekološke prihvatljivosti (eng. *Index of Energy Efficiency and Environmental Eligibility – I4E*), što je napravljeno u poglavlju 5. Pomoću tog indeksa mogu se uspoređivati različiti brodovi te evaluirati različite konfiguracije BES-a za pojedine brodove. Metodologija određivanja *I4E*-a bit će analogna predloženoj metodologiji određivanja EEDI-a, tj. *I4E* će biti definiran kao omjer ekvivalenta onečišćenja okoliša i gospodarskog učina broda. Ekvivalent onečišćenja će se odrediti iz emisija CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> (poglavlje 5.1) i SO<sub>x</sub> (poglavlje 5.2) spojeva. Kako bi se te emisije mogle međusobno usporediti nužno ih je ponderirati i svesti na zajednički nazivnik (poglavlje 5.3). Za ovako definiran *I4E* za ro-ro putničke brodove bit će provedena analiza osjetljivosti (poglavlje 5.4) kako bi se odredilo kako smanjenje emisija pojedinih štetnih tvari utječe na vrijednost *I4E*. Na temelju primjene *I4E* za ro-ro putničke brodove s IES-ima prema bazi izrađenoj u prethodnom poglavlju moći će se zaključiti da brodovi s IES-ima u postojećoj floti mogu biti energetske učinkovitiji i ekološki prihvatljiviji od brodova s konvencionalnim BES-ima (poglavlje 5.5).

Znanstveni doprinos ovoga istraživanja ogleda se u unaprjeđenju metoda vrednovanja energetske i ekološke značajke brodskih IES-a izradom prikladnog računalnog modela. Na temelju tog modela će se onda moći predložiti nove energetske učinkovitije i ekološki prihvatljivije konfiguracije BES-a, što dodatno povećava važnost ovoga istraživanja.

### **3. ENERGETSKA UČINKOVITOST I EKOLOŠKA PRIHVATLJIVOST**

#### **3.1. Pojam energetske učinkovitosti**

Energetska učinkovitost i ekološka prihvatljivost su danas među najčešće korištenim pojmovima u brodskom strojarstvu. Često se ti pojmovi smatraju istoznačnicama pa je potrebno dati jasnu razliku između ta dva pojma.

Energetska učinkovitost broda je relativni odnos utrošene energije i gospodarskog ekvivalenta kojeg brod mora ostvariti u eksploataciji. Količina utrošene energije na brodu ovisi o energetske značajkama BES-a. BES je sustav zadužen za proizvodnju i opskrbu energijom svih brodskih potrošača energije. Energetske značajke BES-a mogu se podijeliti u sljedeće skupine:

1. energetske značajke prvopokretača,
2. energetske značajke potrošača energije, te
3. energetske značajke prijenosa i pohrane energije.

U energetske značajke prvopokretača ubrajamo količinu proizvedene energije pri određenoj specifičnoj potrošnji goriva i uz određenu količinu proizvedenih štetnih tvari. Prvopokretači su strojevi (motori s unutrašnjim izgaranjem, parno-turbinsko postrojenje, plinsko-turbinsko postrojenje, vjetroturbine i dr.) i uređaji (gorivni članci, fotonaponski članci, baterije i dr.) koji pretvaraju primarne oblike energije (fosilna goriva, sunce, vjetar i dr.) u mehaničku ili električnu energiju.

Pod energetske značajkama potrošača energije podrazumijeva se količina i oblik energije koju određenom potrošaču treba dovesti kako bi se mogla ispuniti njegova zadaća, kao i korisnost pretvorbe energije.

Energetske značajke prijenosa i pohrane energije određene su konfiguracijom BES-a, odnosno proizlaze iz načina dovođenja energije od energetske izvora do potrošača. Potrebno je naglasiti da je pravilnim izborom konfiguracije BES-a moguće značajno povećati energetske učinkovitost broda ne mijenjajući pritom značajke ni prvopokretača ni potrošača energije.

S druge strane, gospodarski ekvivalent ovisi o gospodarskoj djelatnosti broda, tj. o svrsi plovidbe. Kod teretnih brodova se gospodarski ekvivalent najčešće izražava u masi tereta izraženoj u tonama koji je prevezen na određenu udaljenost izraženu u nautičkim miljama. Kod drugih tipova trgovačkih brodova mjerilo nisu tone tereta, već kod kontejnerskih broj kontejnera, kod putničkih broj putnika, kod ro-ro brodova često broj vozila, dok kod ro-ro putničkih brodova ne postoji univerzalno primjenjiva mjera.

Također, Projektni indeks energetske učinkovitosti (eng. „*Energy Efficiency Design Index*“ – *EEDI*) [17] se temelji na izravnoj vezi između količine potrošnje goriva (ugljikovodika) i ekvivalentne emisije CO<sub>2</sub>. Stoga brojnik EEDI-a ne predstavlja utrošenu energiju, već ekvivalentnu emisiju CO<sub>2</sub>, pa je EEDI definiran kao omjer emisije CO<sub>2</sub> po gospodarskom ekvivalentu broda.

Ove pojmove treba razlikovati od pojma korisnost energetskog sustava. Korisnost je fizikalna (termodinamička) veličina definirana kao omjer dobivenog rada i utrošene energije. Ovu se veličinu može promatrati zasebno za svaki element u BES-u, ali i na razini dijela sustava ili cijelog energetskog sustava uzimajući u obzir gubitke nastale unutar sustava. Stoga je korisnost porivnog sustava broda, Slika 7, definirana kao omjer snage otpora broda i ukupno dovedene snage motoru (sadržane u kemijskoj energiji goriva), a može se odrediti kao umnožak koeficijenata korisnosti pojedinih elemenata u porivnom sustavu prema:

$$\eta_{por} = \eta_e \eta_R \eta_V \eta_o \eta_r \eta_H = \frac{P_e}{P_{dov}} \frac{P_D}{P_e} \frac{P_T}{P_D} \frac{P_R}{P_T} = \frac{P_R}{P_{dov}} \quad (1)$$

gdje su:

$\eta_{por}$  ... korisnost porivnog sustava,

$\eta_e$  ... efektivna korisnost motora,

$\eta_R$  ... korisnost reduktora,

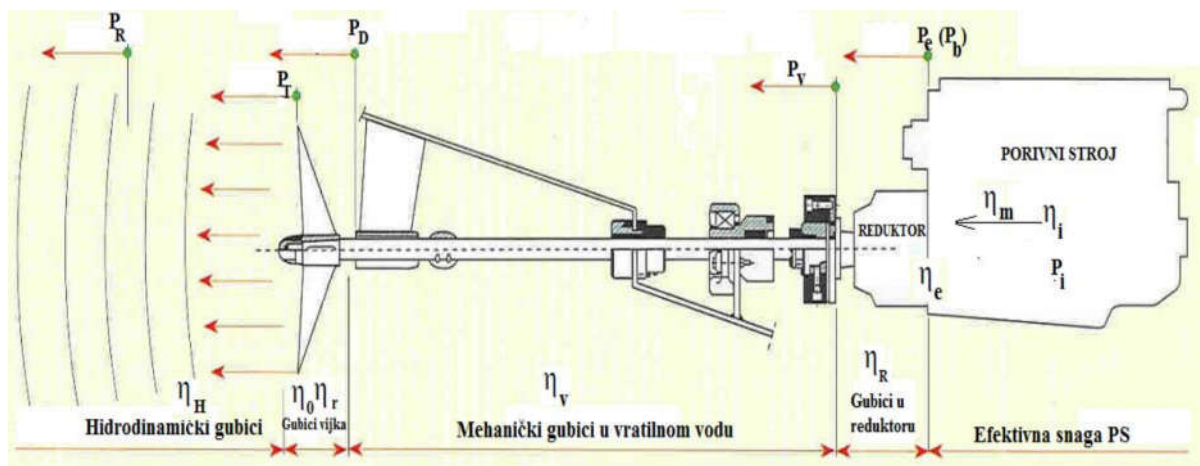
$\eta_V$  ... korisnost vratilnog voda,

$\eta_o$  ... korisnost propulzora u slobodnoj vožnji,

$\eta_r$  ... faktor prijelaza,

$\eta_H$  ... faktor utjecaja trupa,

$P_R \dots$  snaga otpora broda, kW.



### Slika 7 Porivni sustav

Efektivna korisnost motora je definiran kao umnožak indicirane i mehaničke korisnosti motora, dok je indicirana korisnost definirana kao umnožak termodinamičke korisnosti idealnog procesa i stupnja savršenosti realnog procesa. Ipak, kod motora se umjesto efektivne korisnosti češće koristi izraz specifična potrošnja goriva *SFC* izražena u gramima potrošenog goriva po kWh dobivene energije:

$$SFC = \frac{3600}{\eta_e H_d}, \text{ g/kWh} \quad (2)$$

gdje je:

$H_d$  ... donja ogrjevnna moć goriva, MJ/kg.

### 3.2. Pojam ekološke prihvatljivosti

Za razliku od pojmova energetske učinkovitosti i korisnosti, pojam ekološka prihvatljivost nije moguće jednoznačno definirati na jednostavan način. Jedan od načina definiranja ekološki prihvatljivog prijevoza jest da je ekološki prihvatljiv prijevoz onaj koji je održiv [6]. Kako bi prijevoz bio održiv, treba ispunjavati određene pretpostavke, kako je i navedeno u uvodu. Neke od tih značajki održivosti, a time i ekološke prihvatljivosti, poput ispuštanja štetnih tvari u mjeri koju okoliš može apsorbirati ili unutargeneracijske i međugeneracijske pravednosti, teško je ili čak nemoguće kvantificirati. Stoga su u sklopu ovoga istraživanja za određivanje ekološke prihvatljivosti broda kao mjerodavne uzimaju emisije štetnih tvari s broda.

Kako je i prikazano u uvodu ovoga istraživanja, iako je utjecaj na okoliš brodskog prometa manji od nekih drugih industrija, ipak nije zanemariv. Taj se utjecaj može izraziti preko ukupne emisije štetnih spojeva tijekom cijelog životnog vijeka BES-a, tj. tijekom faze proizvodnje (materijala i proizvoda), eksploatacije te uporabe (zbrinjavanja i recikliranja):

$$\sum emisije_{tehnologije} = \sum emisije_{proizvodnja} + \sum emisije_{eksploatacija} + \sum emisije_{oporaba} \quad (3)$$

Kod konvencionalnih BES-a najveći udio emisija štetnih tvari nastaje tijekom eksploatacije, kako su pokazale i studije [7, 8]. Međutim, kod IES-a, a posebice kod tehnologija koje koriste obnovljive izvore energije (vjetar i Sunce), to nije slučaj jer one ne proizvode štetne spojeve tijekom eksploatacije. Budući da i te tehnologije utječu na okoliš prilikom proizvodnje i uporabe ne bi bilo ispravno reći da te tehnologije ne emitiraju štetne plinove. Stoga će u ovom istraživanju sve faze životnog vijeka pojedinih elemenata unutar BES-a biti uzete u obzir.

Kako bi se ispravno procijenio cjeloživotni utjecaj broda na okoliš, potrebno je slijediti metodologiju propisanu prema [18]. Ta metodologija obuhvaća sljedeće korake:

### ***1. Odabrati i definirati kategorije utjecaja na okoliš***

Tijekom cijeloga životnoga vijeka BES-a proizvode se brojne štetne tvari koje različito utječu na okoliš. Unutar ovoga istraživanja analiza će biti ograničena na potencijale:

- globalnog zagrijavanja, koji se iskazuje kao ekvivalentna emisija CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>-eq),
- acidifikacije, koji se iskazuje kao ekvivalentna emisija SO<sub>2</sub> (SO<sub>2</sub>-eq), te
- eutrofikacije, koji se iskazuje kao ekvivalentna emisija NO<sub>2</sub> (NO<sub>2</sub>-eq),

budući da i trenutna regulativa najviše pozornosti pridaje tim kategorijama.

### ***2. Klasificirati emisije štetnih spojeva prema kategorijama utjecaja na okoliš***

Unutar istraživanja promatrat će se emisije CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub> i NO<sub>x</sub> spojeva jer te emisije imaju najveći utjecaj upravo na promatrane kategorije utjecaja na okoliš.

CO<sub>2</sub> se smatra najznačajnijim stakleničkim plinom [4]. Iako postoje kemijski spojevi koji imaju značajno veći globalni potencijal zagrijavanja, emisija tih spojeva je bitno manja tako da je njihov ukupni utjecaj na globalno zagrijavanje malen.

SO<sub>x</sub> spojevi obuhvaćaju SO<sub>2</sub> i SO<sub>3</sub> spojeve. Ti spojevi nastaju oksidacijom sumpora prisutnog u gorivu pri izgaranju. U atmosferi reagiraju s vlagom u zraku i stvaraju sumporastu i sumpornu kiselinu te uzrokuju kisele kiše. To pridonosi povećanju kiselosti tla što negativno utječe na ekosustav. Pri radu BES-a najveći dio sumpora oksidira u SO<sub>2</sub> [4], što je i jedan od razloga da se potencijal acidifikacije izražava kao SO<sub>2</sub> ekvivalent.

NO<sub>x</sub> spojevi obuhvaćaju veći broj spojeva dušika s kisikom. Mehanizam nastajanja tih spojeva, njihov štetan utjecaj na okoliš, kao i tehnologije smanjenja emisija su detaljno prikazane u [19]. Najveći negativni utjecaj imaju spojevi NO i NO<sub>2</sub>. NO u prisutnosti hlapljivih organskih spojeva (eng. *Volatile Organic Compounds* – VOC) oksidira u NO<sub>2</sub>, dok NO<sub>2</sub> uz prisutnost ultraljubičastog zračenja stvara ozon u troposferi koji stvara smog. Također značajan utjecaj na okoliš ima i N<sub>2</sub>O koji je staklenički plin s globalnim potencijalom zagrijavanja oko 300 puta većim od CO<sub>2</sub>. Za razliku od NO i NO<sub>2</sub> spojeva, N<sub>2</sub>O nije reaktivan te ima veoma dug vijek poluraspada (100 do 150 godina). I ostali NO<sub>x</sub> spojevi imaju



negativan utjecaj na okoliš, no pri radu BES-a najviše se proizvede upravo NO i NO<sub>2</sub> spojeva. Budući da u normalnim okolnostima NO brzo oksidira u NO<sub>2</sub>, u pravilu se promatra samo emisija NO<sub>2</sub> spojeva [19], a potencijal eutrofikacije se izražava kao NO<sub>2</sub> ekvivalent.

Uz to treba naglasiti da NO<sub>x</sub> i SO<sub>x</sub> spojevi čine najveći dio krutih čestica manjih od 2,5 µm koje su uzrok mnogih plućnih bolesti [19].

### **3. Odrediti štetne emisije**

Emisije štetnih spojeva izračunat će se na temelju tehničkih podataka brodova sadržanih u „World Register of Ships“ (WROS) bazi podataka uz korištenje dostupnih podataka iz literature.

### **4. Normalizirati štetne emisije**

Štetne emisije različitih plinova koje pripadaju istoj kategoriji potrebno je korigirati određenim faktorom kako bi se njihov štetni utjecaj mogao usporediti. Faktori normalizacije su navedeni za različite emisije i različite kategorije utjecaja na okoliš, Tablica 2. Treba naglasiti da se ovako normalizirani rezultati različitih potencijala ne mogu međusobno uspoređivati.

Tablica 2 Faktori normalizacije za različite emisije i kategorije utjecaja na okoliš [4, 20]

Kategorija utjecaja na okoliš	Emisija	Faktor normalizacije
Potencijal globalnog zagrijavanja	CO <sub>2</sub>	1
	N <sub>2</sub> O	≈300
Potencijal acidifikacije	SO <sub>2</sub>	1
	NO <sub>2</sub>	0,7
Potencijal eutrofikacije	NO <sub>2</sub>	1,35

### **5. Grupirati kategorije utjecaja na okoliš**

Zatim je potrebno grupirati kategorije utjecaja na okoliš prema važnosti za okoliš. To je na određeni način već napravljeno u prvom koraku gdje su odabrane kategorije bitne za ovo istraživanje. Potrebno je još napomenuti da potencijal globalnog zagrijavanja ima globalni utjecaj na okoliš, dok je utjecaj potencijala acidifikacije i eutrofikacije primarno lokalnog karaktera.

## 6. Definirati utjecajne faktore

Kako bi se različite kategorije utjecaja na okoliš mogle usporediti, potrebno je za svaku kategoriju definirati utjecajni faktor. Utjecajni faktori nisu fizikalno odredivi, već su rezultat procjene. Pri definiranju utjecajnih faktora potrebno je uzeti u obzir sve čimbenike koji utječu na posljedice emisija. Zbog svog lokalnog karaktera emisije SO<sub>x</sub> i NO<sub>x</sub> spojeva opasnije su u obalnim područjima. Stoga se može zaključiti da je važnije smanjiti te emisije kod brodova namijenjenih za obalnu plovidbu, nego kod prekooceanskih brodova. S druge strane, emisija CO<sub>2</sub> je globalnog karaktera i podjednako štetna neovisno o ruti plovidbe broda. Ispravno definiranje utjecajnih faktora predstavlja veliki izazov, te će pri definiranju biti korišteni uprosječeni podaci iz dostupne literature, Tablica 3.

Tablica 3 Utjecajni faktori za različite kategorije utjecaja na okoliš [20, 21]

Kategorija utjecaja na okoliš	Utjecajni faktor
Potencijal globalnog zagrijavanja	$0,095 \cdot 10^{-3}$
Potencijal acidifikacije	$18,3 \cdot 10^{-3}$
Potencijal eutrofikacije	$21,1 \cdot 10^{-3}$

## 7. Evaluirati rezultate

Na kraju, pri evaluaciji rezultata potrebno je jasno istaknuti sva ograničenja u primjeni ove metode, kao i pokazati je li ostvaren cilj analize.

Iz navedenih definicija pojmova „energetska učinkovitost“ i „ekološka prihvatljivost“ jasno je da je energetska učinkovitost brodova u neposrednoj vezi s količinom ukupno utrošene energije, dok je pojam ekološke prihvatljivosti širi te ovisi o emisiji štetnih tvari. Stoga korištenje goriva sa smanjenim udjelom sumpora značajno doprinosi ekološkoj prihvatljivosti, dok nema značajan utjecaj na energetska učinkovitost. S druge strane, povišenjem temperature u cilindru dizelskog motora, povećat će se energetska učinkovitost, no, zbog povećane emisije NO<sub>x</sub> spojeva, smanjit će se ekološka prihvatljivost broda. Ovime je potvrđena prva hipoteza doktorskog rada.

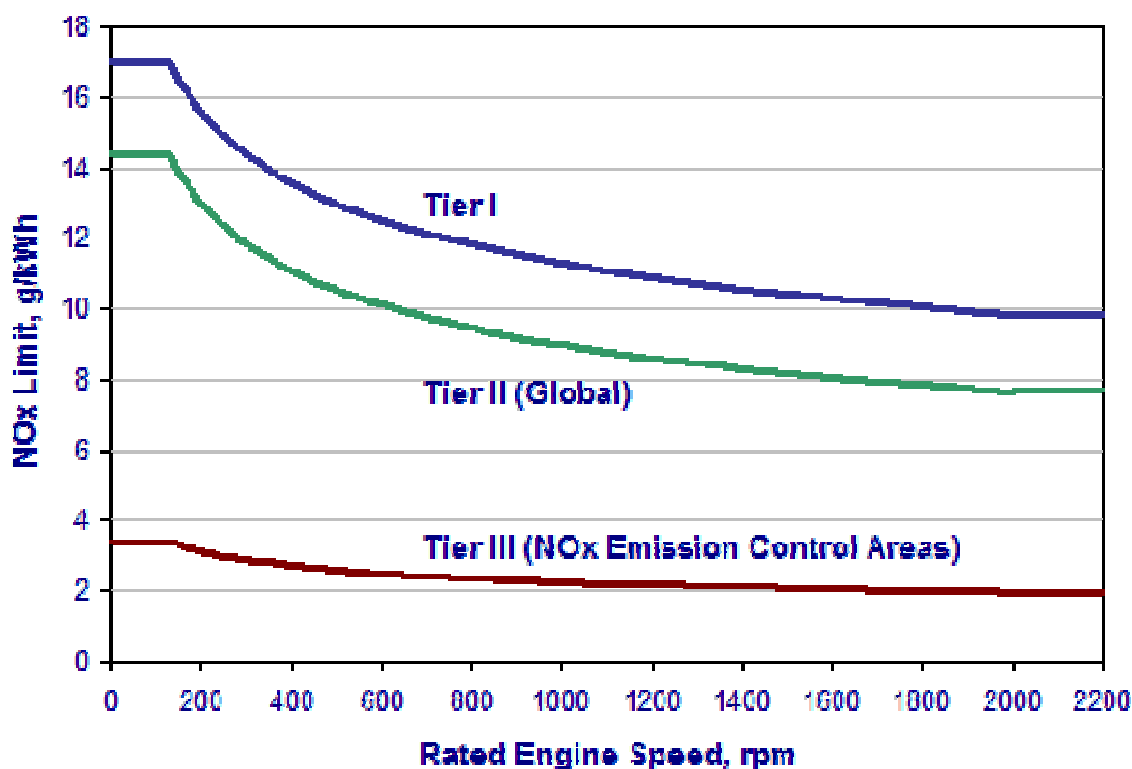
MARPOL (eng. *International Convention for the Prevention of Pollution From Ships, 1973*) Prilog VI [22] sadrži pravila za sprečavanje onečišćenja zraka s brodova, a poglavlje 3 tog Priloga se odnosi na kontrolu emisija tvari koje oštećuju ozonski omotač (eng. *Ozone Depleting Substances - ODS*), NO<sub>x</sub> i SO<sub>x</sub> spojeva, krutih čestica (PM<sub>10</sub>), hlapljivih organskih spojeva te čestica nastalih spaljivanjem u incineratorima.

MARPOL zabranjuje bilo koju namjernu emisiju tvari koje oštećuju ozonski omotač. Tvari koje oštećuju ozonski omotač su primjerice Halon 1211, Halon 1301, Halon 2402, CFC-11, CFC-12, CFC-113, CFC-114, CFC-115, ali i druge koje nisu navedene. Od 19. svibnja 2005. nije dozvoljeno instaliranje postrojenja na brodovima koja sadrže tvari koje oštećuju ozonski omotač, osim HCFC-a, a od 1. siječnja 2020. niti instaliranje postrojenja koja sadrže HCFC. Ove odredbe se ne odnose na opremu koja sadrži takve tvari trajno zatvorene. Zahvaljujući ovim odredbama, procjenjuje se da je između 1998. i 2007. godine emisija CFC spojeva smanjena za 98%, HCFC spojeva za 78%, dok je emisija HFC spojeva porasla za 315% jer se ti spojevi koriste kao zamjena za CFC i HCFC spojeve [4].

MARPOL propisuje dozvoljenu emisiju NO<sub>x</sub> spojeva brodskih motora čija je snaga veća od 130 kW, osim motora za nužnost i motora na brodovima koji nisu namijenjeni za međunarodnu plovību. Motori su podijeljeni u tri razreda, ovisno o datumu gradnje broda (tj. polaganja kobilice), Tablica 4, a detaljne upute za određivanje emisije NO<sub>x</sub> spojeva su sadržane u NO<sub>x</sub> kodu [23]. Motorima koji udovoljavaju zahtjevima MARPOL-a izdaje se Međunarodna svjedodžba o sprečavanju onečišćenja zraka za motor (*Engine International Air Pollution Prevention Certificate – EIAPP Certificate*).

Tablica 4 Vremenski intervali faza primjene zahtjeva MARPOL-a [22]

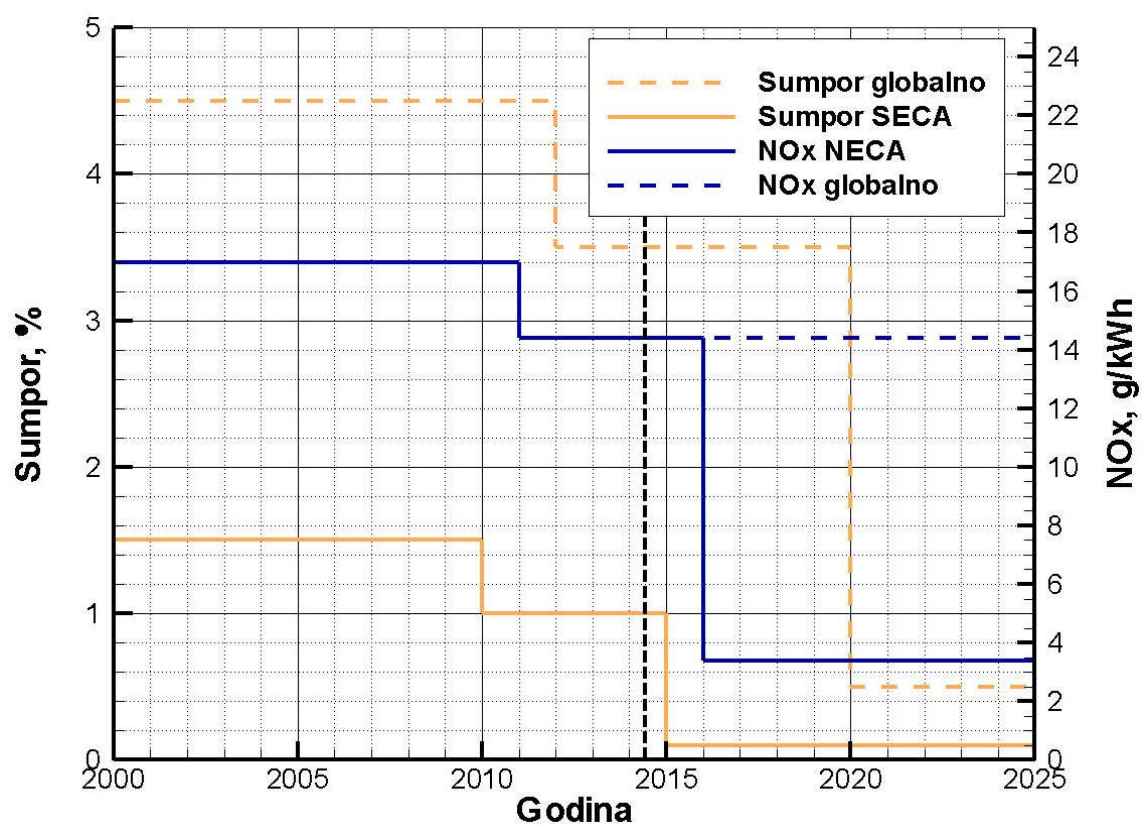
Tier I	1.1.2000. – 1.1.2011.
Tier II	od 1.1.2011.
Tier III	od 1.1.2016.



Slika 8 Dozvoljene emisije NO<sub>x</sub> spojeve prema fazama ovisno o brzini vrtnje motora [22]

Dozvoljene emisije NO<sub>x</sub> spojeva ovise o brzini vrtnje motora, Slika 8. Uvođenjem ovog zahtjeva, procjenjuje se da je između 2000. i 2007. godine smanjena emisija NO<sub>x</sub> spojeva po toni goriva za oko 12-14%. Međutim, procjenjuje se da je apsolutna emisija NO<sub>x</sub> spojeva u tom razdoblju narasla sa 16 na 20 milijuna tona godišnje [4]. Tier III pravila odnose se samo na područja kontrolirane emisije NO<sub>x</sub> spojeva (eng. *NO<sub>x</sub> Emission Control Areas* – NECA). Ta područja (za sada) uključuju obale sjeverne Amerike i Havaja [24] te Kariba [25].

MARPOL također regulira i emisiju SO<sub>x</sub> spojeva, ali na način da ograničava maseni udio sumpora u gorivu, Slika 9. I ovdje postoje područja kontrolirane emisije (eng. *SO<sub>x</sub> Emission Control Areas* – SECA). Područja navedena kao NECA-e su također i SECA-e. Također je i područje Sjevernog mora, Baltičkog mora i La Manchea [22] određeno kao SECA (ali ne i NECA), Slika 10. Procjenjuje se da je u 2008. godini, prvoj godini od kada se u navedenim SECA-ma potpuno primjenjuju odredbe ove konvencije, emisija SO<sub>x</sub> spojeva smanjena za oko 42% u odnosu na hipotetsku situaciju da emisija u SECA-ma nije regulirana.



Slika 9 Dozvoljene emisije  $\text{SO}_x$  i  $\text{NO}_x$  spojeva (za motore čija je brzina vrtnje do 130 o/min) u ovisnosti o području plovidbe u vremenskim intervalima



Slika 10 Područja kontrolirane emisije štetnih spojeva (ECA) [14]

Emisija krutih čestica, PM<sub>10</sub>, nije izrijekom regulirana u MARPOL-u, već se smatra da se korištenjem goriva s ograničenim udjelom sumpora ograničava i emisija PM<sub>10</sub>. Iz dokumenata MEPC-a može se zaključiti da će uskoro i emisija PM<sub>10</sub> biti strože ograničena.

MARPOL uređuje i emisiju hlapljivih organskih spojeva s tankera na način da su tankeri obvezni prilikom utovara tereta u lukama koristiti sustave za sakupljanje hlapljivih organskih spojeva.

Također, nalaže da se spaljivanje otpada na brodu smije vršiti samo u brodskim incineratorima, te propisuje koje se tvari u incineratorima ne smiju spaljivati.

Svim brodovima od 400 GT i većima, kao i platformama, koji udovoljavaju svim zahtjevima MARPOL-a, izdaje se Međunarodna svjedodžba o sprečavanju onečišćenja zraka (eng. *International Air Pollution Prevention Certificate* – IAPP Certificate). Valjanost svjedodžbe je 5 godina, osim u posebnim slučajevima (npr. preinake broda) kada ju je potrebno ponovno izdati.

## 4. OCJENA ENERGETSKE UČINKOVITOSTI BRODA

### 4.1. Sadašnji pristup ocjeni energetske učinkovitosti – EEDI

Nakon provedenih brojnih studija kojima je cilj bio odrediti mjere smanjenja emisije stakleničkih plinova [4, 26-29], Odbor za Zaštitu Pomorskog Okoliša (eng. *Marine Environment Protection Committee* - MEPC) je donio rezolucijom 203(62) [30] izmjene MARPOL-a kojima je Prilogu VI dodano poglavlje 4 pod naslovom: „Pravila za energetske učinkovitost brodova“. Prepoznata namjera tog poglavlja je povećanje energetske učinkovitosti brodova primjenom projektnih i operativnih mjera koje bi rezultirale smanjenjem emisija svih čestica nastalih izgaranjem goriva, uključujući i onih već reguliranih Prilogom VI. Također tim poglavljem želi se potaknuti razvoj i primjena inovativnih energetski učinkovitih tehnologija.

Tim se izmjenama uvodi Projektni indeks energetske učinkovitosti (eng. *Energy Efficiency Design Index – EEDI*) i Brodski plan upravljanja energetskom učinkovitosti (eng. *Ship Energy Efficiency Management Plan - SEEMP*). Brodu koji udovoljava zahtjevima EEDI-a i SEEMP-a izdaje se Međunarodna svjedodžba energetske učinkovitosti (eng. *International Energy Efficiency Certificate – IEE Certificate*).

SEEMP je operativna mjera povećanja energetske učinkovitosti. Svaki brod u međunarodnoj plovidbi čiji je kapacitet 400 GT ili veći mora imati SEEMP prisutan na brodu i razvijen u skladu sa smjernicama [31]. EEDI je projektna mjera povećanja energetske učinkovitosti koja se primjenjuje samo za nove brodove (ili za brodove na kojima je napravljena preinaka). Za te je brodove potrebno izračunati *Postignuti EEDI* (eng. *Attained EEDI*) koji ne smije biti veći od *Zahtijevanog EEDI-a* (eng. *Required EEDI*). Rezolucija [30] jasno izriče: „Svrha EEDI-a je omogućiti nepristranu osnovu za usporedbu, poticati razvoj energetski učinkovitijih brodova te uspostaviti minimalnu razinu energetske učinkovitosti novih brodova ovisno o njihovom tipu i veličini.“ Osim operativnih i projektnih mjera povećanja energetske učinkovitosti, MEPC je razmatrao i uvođenje tržišnih mjera (eng. *Market-based measures – MBM*), na sličan način kao prema Protokolu iz Kyota. Tržišnim mjerama bi bilo moguće oporezivanje emisije CO<sub>2</sub> i trgovanje dozvoljenim emisijama, no te mjere za sada još nisu usvojene.

#### 4.1.1. Zahtijevani EEDI

*Zahtijevani EEDI* se računa za svaki brod ovisno o vrijednosti *EEDI referentne krivulje* (eng. *EEDI reference line value*) i faktoru smanjenja (eng. *Reduction factor*)  $X$ . Vrijednost *EEDI referentne krivulje* se računa prema izrazu (6) danom niže, pri čemu su parametri  $a$ ,  $b$  i  $c$  definirani u [30], Tablica 5. Faktor smanjenja  $X$  predstavlja smanjenje vrijednosti referentne krivulje u određenim vremenskim intervalima, Tablica 6.

$$\text{Postignuti EEDI} \leq \text{Zahtijevani EEDI} \quad (4)$$

$$\text{Zahtijevani EEDI} = (1 - X / 100) \times \text{Vrijednost EEDI referentne krivulje} \quad (5)$$

$$\text{Vrijednost EEDI referentne krivulje} = a \cdot b^{-c} \quad (6)$$

Tablica 5 Vrijednosti parametara za određivanje *EEDI referentne krivulje* za različite tipove brodova [30]

Tip broda	$a$	$b$	$c$	$R^2$	Ukupan broj brodova
Brod za sipki teret	961,79	DWT broda	0,477	0,9289	2512
Brod za ukapljene plinove	1120,00	DWT broda	0,456	0,9446	354
Tanker	1218,80	DWT broda	0,488	0,9574	3655
Kontejnerski brod	174,22	DWT broda	0,201	0,6191	2406
Brod za opći teret	107,48	DWT broda	0,216	0,3344	2086
Brod za rashlađeni teret	227,01	DWT broda	0,244	0,5130	61
Brod za mješoviti teret	1219,00	DWT broda	0,488	0,9575	6



Tablica 6 Vrijednosti faktora smanjenja  $X$  (u postocima) vrijednosti *EEDI referentne krivulje* u vremenskim intervalima za različite tipove brodova [30]

Tip broda	Veličina	Faza 0: 1.1.2013. – 31.12.2014.	Faza 1: 1.1.2015. – 31.12.2019.	Faza 2: 1.1.2020. – 31.12.2024.	Faza 3: od 1.1.2025.
Brod za sipki teret	$\geq 20.000$ DWT	0	10	20	30
	10.000 – 20.000 DWT	n/p	0-10*	0-20*	0-30*
Brod za ukapljene plinove	$\geq 10.000$ DWT	0	10	20	30
	2.000 – 10.000 DWT	n/p	0-10*	0-20*	0-30*
Tanker	$\geq 20.000$ DWT	0	10	20	30
	4.000 – 20.000 DWT	n/p	0-10*	0-20*	0-30*
Kontejnerski brod	$\geq 15.000$ DWT	0	10	20	30
	10.000 – 15.000 DWT	n/p	0-10*	0-20*	0-30*
Brod za opći teret	$\geq 15.000$ DWT	0	10	15	30
	3.000 – 15.000 DWT	n/p	0-10*	0-15*	0-30*
Brod za rashlađeni teret	$\geq 5.000$ DWT	0	10	15	30
	3.000 – 5.000 DWT	n/p	0-10*	0-15*	0-30*
Brod za mješoviti teret	$\geq 20.000$ DWT	0	10	20	30
	4.000 – 20.000 DWT	n/p	0-10*	0-20*	0-30*

\* faktor smanjenja se određuje linearno između te dvije vrijednosti u ovisnosti o veličini broda pri čemu se manja vrijednost primjenjuje na manje brodove

*EEDI referentna krivulja* daje prikaz prosječnog *Postignutog EEDI*-a za cjelokupnu flotu brodova određenoga tipa. Metodologija određivanja *EEDI referentne krivulje* dana je u [32], a rezultati proračuna su prikazani u [33]. Iz rezultata je vidljivo da *EEDI referentna krivulja* veoma dobro aproksimira flotu brodova za sipki teret, brodova za prijevoz plinova, tankera i brodova za prijevoz kombiniranog tereta, dok je za kontejnerske brodove, brodove za opći teret i brodove za rashlađeni teret njena primjenjivost ipak ograničena zbog male vrijednosti koeficijenta determinacije.

Za ro-ro, ro-ro putničke i putničke brodove, metodologija predviđena u [32] se pokazala neprimjenjivom pa je stoga usvojena nova metodologija u [34] prema kojoj je određena *EEDI referentna krivulja* i za ostale tipove brodova i usvojena u [35], Tablica 7.

Tablica 7 Vrijednosti parametara za određivanje *EEDI referentne krivulje* za ostale tipove brodova [35]

Tip broda	$a$	$b$	$c$
Ro-ro brodovi za prijevoz vozila	ako je $DWT / GT < 0,3$ $a = (DWT / GT)^{-0,7} \cdot 780,36,$	DWT broda	0,471
	ako je $DWT / GT \geq 0,3$ $a = 1812,63$		
Ro-ro teretni brodovi	1405,15	DWT broda	0,498
Ro-ro putnički brodovi	752,16	DWT broda	0,381
Brodovi za prijevoz LNG-a	2253,7	DWT broda	0,474
Putnički brodovi s nekonvencionalnom propulzijom	170,84	GT broda	0,214

Također je u [35] usvojen i faktor smanjenja  $X$  za te tipove brodova (Tablica 7), na sličan način kao i za ostale tipove brodova već obuhvaćenih u [30].

Tablica 8 Vrijednosti faktora smanjenja  $X$  (u postocima) vrijednosti *EEDI referentne krivulje* u vremenskim intervalima za dodatne tipove brodova [35]

Tip broda	Veličina	Faza 1: 1.1.2015. – 31.12.2019.	Faza 2: 1.1.2020. – 31.12.2024.	Faza 3: od 1.1.2025.
Ro-ro brodovi za prijevoz vozila	$\geq 10.000$ DWT	10	20	30
Ro-ro teretni brodovi	$\geq 2.000$ DWT	5	20	30
	1.000 – 2.000 DWT	0-5*	0-20*	0-30*
Ro-ro putnički brodovi	$\geq 1.000$ DWT	5	20	30
	250 – 1.000 DWT	0-5*	0-20*	0-30*
Brodovi za prijevoz LNG-a	$\geq 10.000$ DWT	10	20	30
Putnički brodovi s nekonvencionalnom propulzijom	$\geq 85.000$ GT	5	20	30
	25.000 – 85.000 GT	0-5*	0-20*	0-30*

\* faktor smanjenja se određuje linearno između te dvije vrijednosti u ovisnosti o veličini broda pri čemu se manja vrijednost primjenjuje na manje brodove

#### 4.1.2. Postignuti EEDI

Za proračun *Postignutog EEDI*-a koristi se analitički izraz (7). Taj je izraz prvi put definiran u [17], a nakon uočenih brojnih nedostataka, izraz je korigiran prema smjernicama [36]. *Postignuti EEDI* u svome osnovnom obliku jest omjer emisije CO<sub>2</sub> i gospodarskog učina broda. Emisija CO<sub>2</sub> se računa na temelju angažiranog energetskeg resursa koji se određuje pomoću ponderiranih projektnih vrijednosti nazivnih snaga glavnih i pomoćnih motora i projektnih vrijednosti inovativnih ušteda i utilizacijskih efekata, Slika 11. Gospodarski učin iskazan je projektnim predviđanjem brzine s kojom će brod prevoziti projektom predviđenu masu tereta. Prema smjernicama [36] ponderirane vrijednosti snaga energetskih izvora određuju se na temelju bilance potrošnje električne energije.

$$EEDI = \frac{\left( \prod_{j=1}^M f_j \right) \left( \sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}) + \left( \left( \prod_{j=1}^M f_j \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} P_{AEff(i)} \right) C_{FAE} \cdot SFC_{AE} \right) - \left( \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} P_{eff(i)} C_{FME} \cdot SFC_{ME} \right)}{f_i \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w}$$

[gCO<sub>2</sub>/(tonne.nm)]

Slika 11 Grafički prikaz doprinosa pojedinih članova u brojniku *Postignutog EEDI*-a [14]

$$\begin{aligned}
EEDI = & \frac{\left( \prod_{j=1}^M f_j \right) \left( \sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE*})}{f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot Kapacitet \cdot f_w \cdot V_{ref}} + \\
& + \frac{\left( \left( \prod_{j=1}^M f_j \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{AEff(i)} \right) C_{FAE} \cdot SFC_{AE} \right) - \left( \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME**} \right)}{f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot Kapacitet \cdot f_w \cdot V_{ref}} \quad (7)
\end{aligned}$$

gdje su:

$P_{ME}$  75%  $P_{MCR}$  (maksimalne trajne snage) instaliranih glavnih motora nakon oduzimanja snage vratilnih generatora, kW;

$P_{AE}$  snaga pomoćnih motora potrebna isključivo za podmirenje energetske potrebe sustava propulzije i potrebe smještaja pri normalnom stanju plovidbe, kW; za brodove, čija je ukupna snaga porivnog sustava iznad 10 MW, računa se prema izrazu (8), a za brodove, čija je ukupna snaga porivnog sustava manja, računa se prema izrazu (9):

$$P_{AE(\sum MCR \geq 10,000 \text{ kW})} = \left( 0,025 \times \left( \sum_{i=1}^{nME} MCR_{ME(i)} + \frac{\sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)}}{0,75} \right) \right) + 250 \quad (8)$$

$$P_{AE(\sum MCR < 10,000 \text{ kW})} = \left( 0,05 \times \left( \sum_{i=1}^{nME} MCR_{ME(i)} + \frac{\sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)}}{0,75} \right) \right) \quad (9)$$

$P_{PTI}$  75% nominalne snage instaliranih vratilnih motora podijeljene s prosječnim stupnjem korisnosti dizel-električnih agregata, kW;

$P_{AEff}$  smanjenje snage pomoćnih motora zbog inovativnih energetski učinkovitih električnih tehnologija, kW;

$P_{eff}$  doprinos inovativnih energetski učinkovitih mehaničkih tehnologija pri 75%  $P_{MCR}$  glavnog motora, kW;

$C_F$  koeficijent pretvorbe goriva u CO<sub>2</sub>, kg CO<sub>2</sub>/kg goriva, Tablica 9;

Tablica 9 Koeficijent pretvorbe goriva u CO<sub>2</sub>

Vrsta goriva	Referenca	Sadržaj ugljika	$C_F$ (t CO <sub>2</sub> / t goriva)
Plavi dizel (eng. <i>Diesel/Gas Oil</i> )	ISO 8217 gradacija DMX do DMB	0,8744	3,206
Lako dizelsko gorivo (eng. <i>Light Fuel Oil - LFO</i> )	ISO 8217 gradacija RMA do RMD	0,8594	3,151
Teško dizelsko gorivo (eng. <i>Heavy Fuel Oil - HFO</i> )	ISO 8217 gradacija RME do RMK	0,8493	3,114
Ukapljeni naftni plin – UNP (eng. <i>Liquefied Petroleum Gas - LPG</i> )	Propan	0,8182	3,000
	Butan	0,8264	3,030
Ukapljeni prirodni plin – UPP (eng. <i>Liquefied Natural Gas - LNG</i> )	Metan	0,7500	2,750

$SFC$  specifična potrošnja goriva, g/kWh – koristi se podatak iz NO<sub>x</sub> tehničkog zapisnika korigiran na standardne uvjete propisane;

$f_j$  korekcijski faktor zbog posebnih konstrukcijskih značajki broda;

$f_i$  faktor smanjene nosivosti zbog tehničkih ili regulatornih ograničenja;

$f_c$  korekcijski faktor smanjene zapremine;

$f_l$  faktor smanjene nosivosti zbog opreme za teret;

$f_w$  faktor stanja mora;

$f_{eff}$  faktor dostupnosti inovativnih energetske efikasne tehnologije;

*Kapacitet* DWT – za brodove za sipki teret, tankere, brodove za ukapljene plinove, ro-ro teretne brodove, ro-ro putničke brodove, brodove za opći teret, brodove za rashlađeni teret i brodove za mješoviti teret,

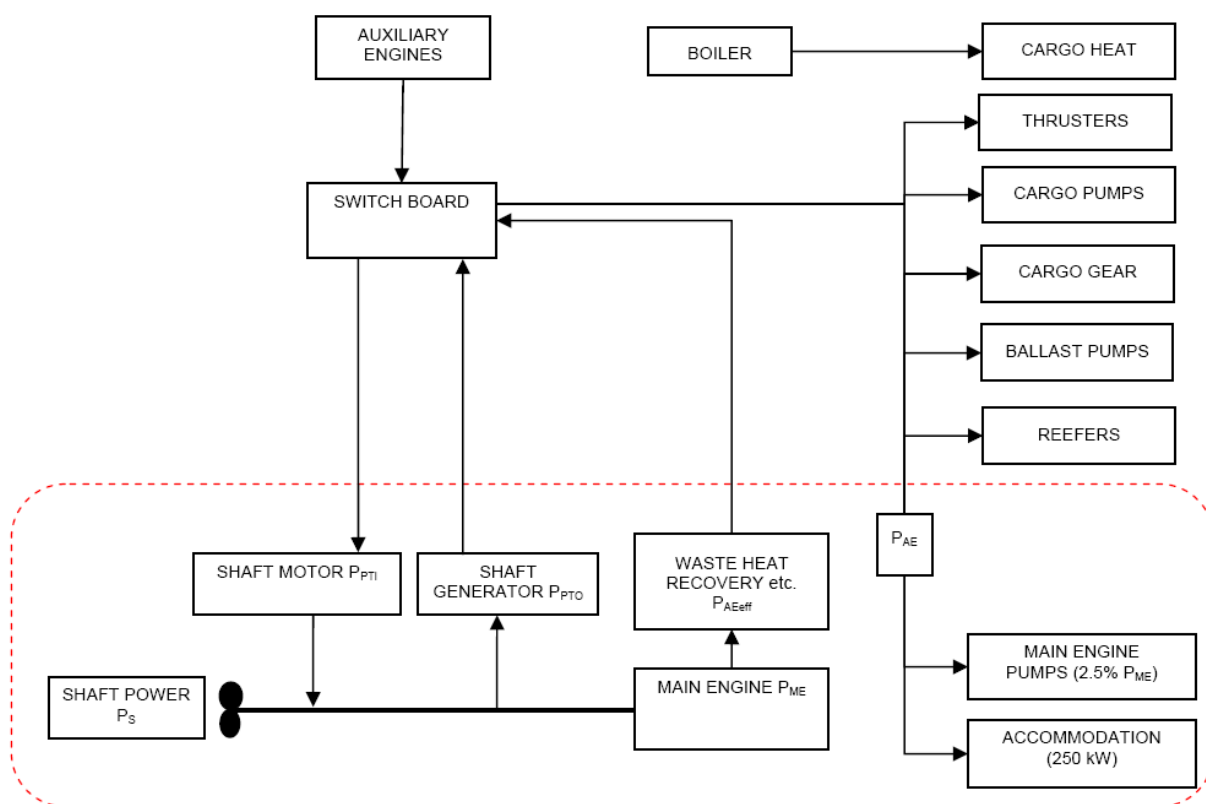
GT – za putničke brodove,

70% DWT – za kontejnerske brodove;

$v_{ref}$  brzina koja se može postići u referentnim uvjetima, tj. pri  $P_{ME}$  i punom kapacitetu uz pretpostavku mirnog mora i bez vjetera, čv.

Potrebno je napomenuti, kako stoji i u smjernicama za proračun *Postignutog EEDI*-a, da ovaj izraz nije primjenjiv na dizel-električnu propulziju, turbinsku propulziju i hibridne propulzijske sustave.

Proračunski algoritam (7) temelji se na principijelnoj i pojednostavljenoj općoj shemi BES-a, Slika 12. Na slici je crveno označena granica energetske sustava koji ulazi u proračun *Postignutog EEDI*-a. Vidljivo je da u proračun ulazi porivni sustav, dio elektroenergetskog sustava te sustavi utilizacije otpadne topline.



Slika 12 Principijelna i pojednostavljena shema BES-a [17]

#### 4.1.3. EEDI tehnički zapisnik

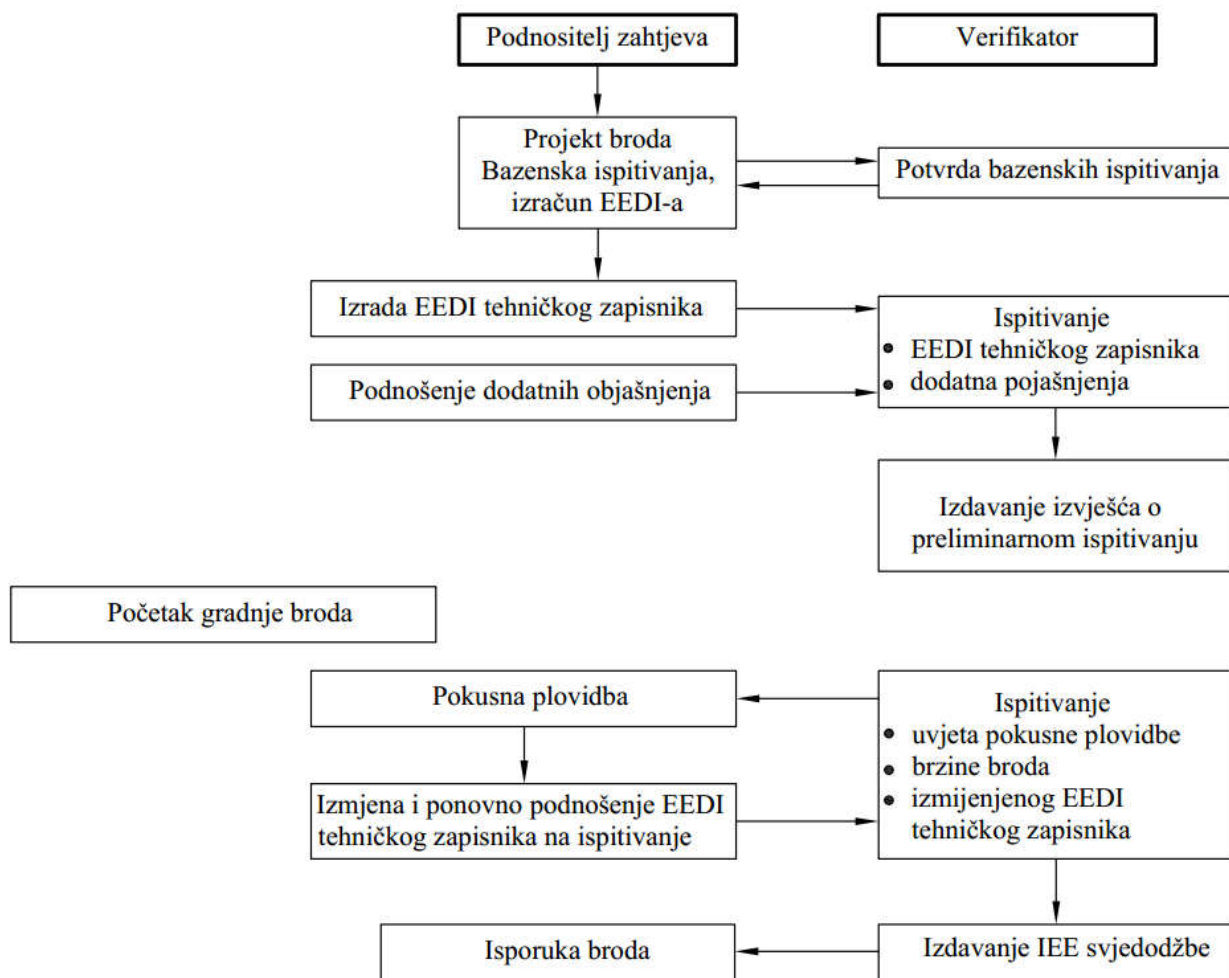
U [37] je prikazan postupak dobivanja IEE svjedodžbe. Dijagramom toka, Slika 13, predviđeno je da postupak verifikacije započinje u fazi pretprojekta i da se brodu prije početka gradnje izda preliminarno izvješće kojim se potvrđuje da brod udovoljava pravilima o energetske učinkovitosti broda. IEE svjedodžba se izdaje tek nakon što se pokusnom plovidbom potvrde projektom predviđene vrijednosti parametara koje utječu na vrijednost *Postignutog EEDI*-a. Podnositelj zahtjeva (brodogradilište, projektni ured, brodovlasnik ili dr.) izrađuje EEDI tehnički zapisnik, a verifikator (država ili organizacija koju je država ovlastila, npr. klasifikacijsko društvo) pregledava zapisnik te izdaje svjedodžbu.

EEDI tehnički zapisnik mora sadržavati barem:

1. podatke potrebne za izračun *Postignutog EEDI*: kapacitet (DWT ili GT), maksimalnu trajnu snagu glavnih i pomoćnih motora, referentnu brzinu, vrstu i specifičnu potrošnju goriva te bilancu potrošnje električne energije (ako je potrebno);
2. prognozni dijagram za referentne uvjete – u projektnoj fazi te s pokusne plovidbe;
3. osnovne dimenzije i tip broda, kao i podatke potrebne za klasifikaciju broda te opis porivnog sustava i sustava snabdijevanja električnom energijom;
4. metodologiju predviđanja prognoznog dijagrama u projektnoj fazi;
5. opis inovativnih energetski učinkovitih tehnologija;
6. izračun *Postignutog EEDI*-a;
7. izračun *Postignutog EEDI<sub>weather</sub>* i  $f_w^*$

\* Izračun *Postignutog EEDI<sub>weather</sub>* i  $f_w$  nije obavezan. Ako je proveden, potrebno ga je priložiti EEDI tehničkom zapisniku.





Slika 13 Dijagram toka u postupku verifikacije *Postignutog EEDI-a*

#### 4.1.4. Kritički osvrt na trenutni pristup definiranju EEDI-a

Može se reći da energetske učinkovitost bilo kojeg energetskog sustava predstavlja kvantificirani odnos između korištenog energetskog resursa i korisnog učinka kojega se može egzaktno utvrditi kao neposrednu posljedicu korištenja tog istog resursa.

Primjena spomenutog temeljnog načela na BES-ima zahtijeva u prvom koraku definiranje na kojoj će se razini cjeloživotnog ciklusa analizirati energetska učinkovitost. U drugom koraku potrebno je kvantificirati angažiranje brodskog energetskog resursa i egzaktno iskazati neposredni gospodarski učinak. Dvije osnovne razine za analizu su projektna i eksploatacijska.

Za analizu na projektnoj razini ponuđen je analitički izraz (7) za proračun *Postignutog EEDI-a*. U ovom se slučaju korišteni energetske resurs želi odrediti pomoću ponderiranih projektnih vrijednosti nazivnih snaga glavnih i pomoćnih motora i projektnih vrijednosti inovativnih ušteda i utilizacijskih efekata, a izraziti ga u obliku masene emisije CO<sub>2</sub>. Gospodarski učinak iskazan je projektnim predviđanjem brzine s kojom će brod prevesti projektom predviđenu količinu tereta. Donesene su smjernice [36] prema kojima se ponderirane vrijednosti snaga energetskih izvora određuju na temelju bilance potrošnje električne energije. Ta je bilanca „kvazistatička“ i zasniva se na čitavom nizu pretpostavki iz čega proizlaze mogućnosti velikih pogrešaka u procjeni EEDI-a u odnosu na realna stanja u eksploataciji, i ne mogu biti generalizirana etalonska vrijednost za više tipova brodova. Naime, potrebe za energijom tijekom eksploatacije broda ovise o mnogo varijabli te imaju nestacionarni karakter. Osnovni preduvjet za optimiranje veličine ukupnog energetskog resursa broda je poznavanje dinamičke energetske bilance za pojedini tip broda i pojedinu rutu plovidbe. Tek uz pomoć tog „alata“ moguće je definirati egzaktne vrijednosti utjecajnih koeficijenata i izgraditi pouzdane izraze za proračun *Postignutog EEDI-a*.

Primarni cilj uvođenja EEDI-a, koji je u više navrata izgubljen iz vida na sjednicama MEPC-a i pripadajućih pododbora, jest smanjenje emisije stakleničkih plinova, odnosno povećanje ekološke prihvatljivosti broda. Taj je cilj jasno u tijesnoj vezi s povećanjem energetske učinkovitosti. Naime, svi doprinosi energetske učinkovitosti BES-a u vidu inovativnih ušteda ili utilizacijskih efekata se odražavaju kroz manju potrebnu angažiranu snagu prvopokretača (motora, kotlova, incineratora itd.) kao jedinih generatora emisije CO<sub>2</sub>. Time se postiže veća ekološka prihvatljivost energetski učinkovitijeg broda.

Emisiju CO<sub>2</sub> BES-a je moguće odrediti ili analizirajući energetske značajke prvopokretača, što je jednostavnije i transparentnije, ili natražno analizirajući energetske značajke potrošača energije i cjelokupnu učinkovitost energetskog sustava. To je u projektnoj fazi zasnovano na čitavom nizu pretpostavki, ali u konačnici, ako je ispravno napravljeno, daje jednaki rezultat. Upravo je takva natražna metodologija analize energetskih značajki potrošača energije i cjelokupne učinkovitosti BES-a korištena u formuli (7).

No, ovdje se javlja problem jer prema [36] definicija  $P_{ME}$  ima nejasne posljedice na EEDI. Kao što je već spomenuto,  $P_{ME}$  je 75% MCR-a nakon oduzimanja snage vratilnih generatora. Međutim nije jasno kako odrediti MCR. Trenutna definicija navodi na to da je MCR stvarno instalirana snaga motora s EIAPP svjedodžbe ili, u nedostatku istoga, podatak s pločice na motoru. Sada se postavlja pitanje načina odabira motora u projektnoj fazi. Ako su u projektnoj fazi već predviđene mjere uštede energije, u formuli (7) označene kao  $P_{eff}$ , i posebno ako su one značajnijeg iznosa, to će se u pravilu odraziti na odabir motora. Ako bi to dovelo do odabira motora manje snage, to bi značilo da se pri određivanju *Postignutog EEDI*-a uštede energije uzimaju u obzir dva puta, najprije u vidu smanjenog  $P_{ME}$ , a potom i negativnog  $P_{eff}$ .

Taj je nedostatak već primijećen u [38] i zahtijevano je pojašnjenje. Kakav utjecaj ovakvo shvaćanje formule ima, prikazano je u [39] kroz izračun *Postignutog EEDI*-a 88-metarskog jedrenjaka „Maltese Falcon“. Brod je pokretan pomoću dva dizelska motora svaki snage 1.500 kW s kojima postiže brzinu od 14 čv. No, s jedrima brod postiže brzinu od čak 19,6 čv. Uz pretpostavku kubne ovisnosti snage motora o brzini broda, dolazi se do zaključka da bi brodu bila potrebna snaga od oko 8.230 kW da postigne tu brzinu. To bi značilo da bi  $P_{eff}$  iznosio više od  $P_{ME}$  i  $P_{AE}$  zajedno. U tom bi slučaju brojnik, a time i cijeli *Postignuti EEDI*, postao negativan. Ovako određen EEDI ne bi imao nikakav fizikalni smisao:

snaga glavnih motora

$$P_{ME} = 0,75 \times \sum MCR = 0,75 \times 3.000 = 2.250 \text{ kW}$$

snaga pomoćnih motora

$$P_{AE} = 0,05 \times \sum MCR = 0,05 \times 3.000 = 150 \text{ kW}$$

snaga za propulziju

$$P_{potrebno, 19,6 \text{ čv}} = \sum MCR \times \left( \frac{v_{ref2}}{v_{ref1}} \right)^3 = 3.000 \times \left( \frac{19,6}{14} \right)^3 = 8.230 \text{ kW}$$

snaga mehaničkih inovativnih energetski učinkovitih tehnologija - jedra

$$P_{eff} = 0,75 \times (P_{potrebno, 19 \text{ čv}} - \sum MCR) = 0,75 \times (8.230 - 3.000) = 3.920 \text{ kW}$$

$$\rightarrow P_{eff} > P_{ME} + P_{AE}$$

Stoga su u okviru Dopisne grupe za energetske učinkovite mjere brodova (eng. *The correspondence group on energy efficiency measures for ships*) izrađene smjernice [40] s ciljem osiguranja jednoznačne primjene proračunskog algoritma za sve inovativne energetske učinkovite tehnologije i sve brodove. Prema tim smjernicama referentna brzina  $v_{ref}$  se određuje bez inovativnih energetske učinkovitih tehnologija, a iznos  $P_{eff}$  se određuje onda pri toj brzini. Ovakav pristup osigurava jednoznačan pristup za sve brodove. Međutim, taj pristup nije nužno ispravan jer referentna brzina ovako definirana nije nužno i projektna brzina.

Definicija  $P_{AE}$  [36] je posebno upitna jer negira sve prijašnje definicije prema kojima se uzimala u obzir sva snaga koju proizvode pomoćni motori, kotlovi, incineratori itd. Na taj su način izuzeti svi drugi pomoćni sustavi koji zahtijevaju snagu koja je značajna, a nerijetko na razini ili čak veća od snage porivnog sustava. Izuzimanjem dijela brodskih sustava iz ukupne bilance potrošnje energije formula prestaje biti primjenjiva na integrirane i hibridne brodske energetske sustave jer tok energije više nije jednoznačno definiran. To je možda i ključan razlog zašto je formula za *Postignuti EEDI* ograničena na konvencionalne BES-e.

Nadalje, sporna je i definicija *SFC* – specifične potrošnje goriva. Prema [36] to je podatak iz EIAPP svjedodžbe kojega mora imati svaki motor iznad 130 kW [22], pri čemu je referentan podatak *SFC* pri 75% MCR za glavne motore, a 50% MCR za pomoćne motore. No, referentna snaga za pomoćne motore nije definirana kao 50% MCR, već kao udio snage glavnih motora, a te dvije vrijednosti mogu značajno odstupati jedna od druge.

Pri izdavanju EIAPP svjedodžbe, primarno u svrhu određivanja emisije  $\text{NO}_x$  spojeva, izravno se mjeri i emisija  $\text{CO}_2$ , dok se vrijednost *SFC*-a posredno određuje. Stoga nije jasno zašto se taj podatak o emisiji ne koristi izravno. To bi riješilo i dvojbu je li  $C_F$  zaista ovisan isključivo o masenom udjelu ugljika u gorivu kako se tvrdi u [36]. To vrijedi uz pretpostavku potpunog izgaranja, no takvo u stvarnosti ne postoji. Korištenjem podataka o proizvedenom  $\text{CO}_2$  pri ispitivanju prilikom izdavanja EIAPP svjedodžbe i taj bi se problem mogao riješiti.

Osim metodologije određivanja *Postignutog EEDI*-a, dvojben je i metodologija određivanja *Zahtijevanog EEDI*-a. Iako je za proračun *EEDI referentne krivulje* za ro-ro putničke brodove predložena nova metodologija [34], ona je tek neznatno različita od prvotno predložene, pa se javlja pitanje je li tako usvojena *EEDI referentna krivulja* uistinu referentna za navedene tipove brodova. Budući da podaci o statističkom slaganju nisu javno objavljeni, potrebno je provesti postupak određivanja *EEDI referentne krivulje* kao i koeficijenta determinacije kako bi se ti rezultati mogli kritički analizirati.

Također se postavlja pitanje utjecaja EEDI-a na smanjenje emisija CO<sub>2</sub> s brodova, što je u izravnoj vezi s faktorom smanjenja  $X$ . Naime, trenutna dinamika promjene faktora smanjenja je svedena ugrubo na 10% svakih 5 godina. To nije potkrijepljeno ni s jednom studijom. U [13] je procijenjena emisija CO<sub>2</sub> flote brodova za sipki teret i u slučaju da se primjenjuje EEDI kako je usvojen u MARPOL-u. Smanjenje emisija je značajno, jer je rast godišnje emisije u razdoblju od 2020. do 2040. godine smanjen s procijenjenih 410% na 126%, što odgovara prosječnom godišnjem rastu od 6,3%. To je bitno manje u usporedbi sa slučajem da regulativa ne postoji (ili se ne primjenjuje), međutim i dalje bitno više od zahtjeva postavljenih u [11]. Stoga je zaključak da je potrebna korekcija EEDI-a kako bi se postigli željeni ciljevi smanjenja emisije CO<sub>2</sub>.

Osim što zahtjevi EEDI-a nisu usklađeni sa željenim ciljevima smanjenja emisije CO<sub>2</sub>, također ni metodologija proračuna *Postignutog EEDI-a* nije dovoljno razrađena, a primjena EEDI-a je ograničena na konvencionalne brodove i na konvencionalne BES-e. Stoga se može zaključiti da EEDI u trenutnom obliku ne daje ispravnu sliku utjecaja na okoliš BES-a, kako je zaključeno i u [41-44], jer EEDI valorizira energetska učinkovitost broda promatrajući samo dio BES-a zaduženog za snabdijevanje potreba porivnog sustava i smještaja posade i to u samo jednoj radnoj točki [36].

EEDI, premda u nazivu ima pojam „energetska učinkovitost“, se zapravo razvio iz CO<sub>2</sub> Indeksa, i koji je bio definiran kao omjer proizvedenog CO<sub>2</sub> po prevezenoj toni i milji. No, zbog raznoraznih (primarno političkih) razloga, MEPC je odlučio preimenovati taj CO<sub>2</sub> Indeks u EEDI. Iako u tijesnoj vezi, energetska učinkovitost i emisija CO<sub>2</sub> nisu istoznačnice, što je posebno vidljivo kod BES-a koji ne koriste goriva na bazi ugljika te u eksploataciji ne proizvode CO<sub>2</sub>.

U trenutnom obliku EEDI je veoma ovisan o brzini broda [41,45], i nije primjenjiv za ro-ro, ro-ro putničke i putničke brodove [39, 43], ni na male brodove [44,46], kao ni za IES-e [36]. U [42] je predložen pristup koji bi mogao biti primjereniji, no kojemu je potrebna dorada i provjera kako bi mogao postati univerzalno primjenjiv (detaljnije u poglavlju 4.3.2). Kako bi se ispitivanje raznih pristupa moglo provesti, potrebno je prethodno napraviti detaljnu analizu postojeće flote brodove, osobito analizu utjecajnih faktora na energetska učinkovitost i ekološku prihvatljivost BES-a u postojećoj floti brodova. Budući da su najveći problemi u primjeni EEDI-a uočeni za flotu ro-ro putničkih brodova, ta će analiza biti ograničena upravo na tu vrstu brodova.

## **4.2. Analiza flote ro-ro putničkih brodova**

### *4.2.1. Analiza tehničkih značajki flote ro-ro putničkih brodova*

Ograničen i dobro poznat akvatorij plovidbe (a ponekad i sama ruta plovidbe) brodova za obalnu plovidbu daje mogućnost optimiranja njihovog BES-a kako bi se njihov štetni utjecaj na okoliš u životnom vijeku broda sveo na minimum. Ti se brodovi razlikuju od prekoceanskih po tome što plove na kraćim rutama uz češći i dulji boravak u lukama. To podrazumijeva češće manevriranje kao i dulji rad motora pri minimalnom opterećenju, u uvjetima koji su za dizelski motor daleko od optimalnih. Stoga se kod tih brodova u cilju povećanja energetske učinkovitosti i ekološke prihvatljivosti BES-a kao prihvatljiva alternativa ističu integrirani energetske sustavi (IES) [47], a posebnu ulogu imaju i primjena alternativnih goriva kao i obnovljivi izvori energije.

Ro-ro putnički brodovi su odgovorni za emisiju oko 31 milijuna tona CO<sub>2</sub> u 2012. godini [48]. Iako je ta emisija bitno manja u usporedbi s teretnim brodovima, opasnost od emisija štetnih plinova s ro-ro putničkih brodova po zdravlje ljudi je čak i veća [6], jer ti brodovi značajno vrijeme provode u blizini ili u samom akvatoriju luka. Posebna gospodarska važnost tih brodova je vidljiva u Jadranskom moru. Putnički i ro-ro putnički brodovi plove na brodskim, brzobrodskim i trajektnim linijama kojima se u 2015. godini prevezlo oko 12,5 milijuna putnika i gotovo 3 milijuna vozila između kopna i brojnih otoka [49].

Putničkim se brodovima smatraju svi brodovi koji su ovlašteni prevoziti više od 12 putnika te su za tu svrhu posebno izgrađeni i opremljeni. Ro-ro putnički brodovi su putnički brodovi opremljeni dodatnim palubama za vozila koja se krcaju na vlastitim kotačima preko rampi. Te rampe mogu smještene na pramcu, krmi i/ili bokovima broda [50]. Ova definicija ro-ro putničkih brodova je relativno široka te obuhvaća brojne brodove s raznovrsnim projektnim zahtjevima, Slika 14 - 21. Upravo nemogućnost jednoznačnog definiranja projektnog zahtjeva otežava usporedbu različitih ro-ro putničkih brodova. Ovisno o primarnoj namjeni broda kod ro-ro putničkih brodova paralelno se koriste različite mjere za kapacitet: broj putnika, broj kabina, broj sjedala, nosivost u DWT, GT, duljina staze za vozila i dr.





Slika 14 m/b „Cruise Barcelona“ [51]



Slika 15 m/b „Piana“ [51]



Slika 16 m/t „Zadar“ [51]



Slika 17 HSC „Villum Clausen“ [51]





Slika 18 m/t „Juraj Dalmatinac“ [51]



Slika 19 m/t „Vladimir Nazor“ [51]



Slika 20 m/b „Sveti Marin“ [51]



Slika 21 m/t „Sveti Juraj“ [51]

Tablica 10 Tehničke značajke brodova prikazanih na slikama

Ime broda	Duljina između okomica, m	Kapacitet	Vrsta BES	Snaga, kW	Brzina, čv
Cruise Barcelona	225	54.300 GT, 5.000 DWT, 3.000 m staze za vozila, 2.850 putnika	IES – dizel-električni	55.400	28
Piana	167,5	42.180 GT, 11.300 DWT 2.500 m staze za vozila, 800 putnika	BES s vratilnim električnim strojem	38.400 + 4.800 + 4.000	24
Zadar	103	9.500 GT, 280 automobila i 1.053 putnika	konvencionalni, dvovijčani	7.000 + 2.400	17,5
Villum Clausen	84	6.400 GT, 569 DWT, 215 automobila i 1.055 putnika	2 plinske turbine, vodomlazni propulzor	50.000	47
Juraj Dalmatinac	88	3.193 GT, 138 automobila i 1.200 putnika	konvencionalni, 4 azimutna propluzora	2.150 + 550	13
Vladimir Nazor	80	70 automobila i 450 putnika	konvencionalni, Voith-Schneider	1.600 + 300	11,5
Sveti Marin	42	496 GT, 230 DWT, 51 automobil i 210 putnika	konvencionalni, dvovijčani	1.100 + 210	11
Sveti Juraj	50	45 automobila i 300 putnika	IES – dizel-električni	-	11



Osim razlika u teretu, značajne su i razlike u projektnim brzinama ro-ro putničkih brodova. Budući da upravo brzina broda ima najveći utjecaj na *Postignuti EEDI*, lako je zaključiti da brodovi projektirani za veće brzine imaju bitno lošiji (veći) *Postignuti EEDI*, iako to ne znači nužno da su ti brodovi zbilja energetske manje učinkoviti. To je posebno vidljivo kod manjih ro-ro putničkih brodova koji su ili projektirani za veoma male brzine (poput trajekata čija je projektna brzina u pravilu ispod 15 čv) ili veoma velike brzine (poput katamarana čija je projektna brzina u pravilu iznad 30 čv).

Također, kod ro-ro putničkih brodova posebno dolazi do izražaja i zaliha snage glavnih motora. Naime, ro-ro putnički brodovi su najčešće namijenjeni za obalnu plovidbu i samo su dio većeg transportnog lanca. Stoga je njihova plovidba strogo definirana rasporedom. Zato ti brodovi imaju određenu zaliha snage kako bi mogli kompenzirati povećan otpor broda zbog teškoga mora, eventualna kašnjenja u polasku i sl. Dodatno, ti brodovi najčešće prevoze veoma vrijedan teret te je, osim točnosti rasporeda, bitna i pouzdanost prijevoza. Kako bi pouzdanost bila povećana, ovi su brodovi često dvovijčani te imaju dva ili četiri glavna dizelska motora, a zaliha snage je tolika da brod najčešće može postići ekonomsku brzinu pri mirnom moru koristeći samo tri od četiri motora. To također omogućuje redovito održavanje motora u plovidbi budući da je vrijeme između dvije plovidbe provedeno u luci kod tih brodova veoma kratko.

Nadalje, za razliku od većine teretnih brodova u kojima je udio snage pomoćnog postrojenja bitno manji od snage porivnog sustava, kod ro-ro putničkih brodova taj omjer uvelike varira. Ovdje posebno treba uzeti u obzir i tzv. „hotelski smještaj“. Budući da prevoze putnike, ovi brodovi trebaju osigurati i određenu razinu udobnosti plovidbe. Ta razina udobnosti je blisko povezana s razinom potrošnje električne energije. Na kraćim linijama putnici se najčešće prevoze na sjedalima na palubi i/ili u salonu. Kod tih brodova električna energija se koristi primarno za rasvjetu i klimatizacijski sustav. S druge strane, na duljim linijama putnici su u pravilu smješteni u kabinama. Predviđeni su i različiti sadržaji kako bi se povećala udobnost plovidbe, od restorana, kafića i plesnih dvorana, pa do bazena i dr. Sve to iziskuje dodatni prostor, pa ti brodovi prevoze bino manje putnika po GT, a također i troše značajno više električne energije, pa metodologija određivanja snage „pomoćnog“ postrojenja prema izrazima (8) i (9) ne daje niti približno točne rezultate.

Stoga su predstavnici Danske i Japana u MEPC-u predložili novu metodologiju [52] s ciljem preciznijeg određivanja prosječne potrošnje električne energije ro-ro putničkih brodova u plovidbi. Na temelju podataka iz IHSF baze podataka te mjerenja stvarno potrošene električne energije određen je omjer između prosječno korištene i ukupno instalirane električne snage u „normalnoj plovidbi“ (eng. *normal maximum sea load* - NMSL). Međutim, točnost tog izračuna je upitna [39]. Naime, taj omjer je izračunat na temelju samo 16 brodova, pri čemu je svega pet od tih brodova bilo mlađe od 10 godina, a čak ih je 11 imalo kapacitet između 10.000 i 17.000 GT. Ovako odabran uzorak nikako se ne može smatrati reprezentativnim. Dapače, iz njega se može čak iščitati i određeni trend: za brodove građene 1980.-ih omjer prosječno korištene i instalirane snage pomoćnog postrojenja je oko 0,25, za brodove građene 1990.-ih godina oko 0,35, dok je za brodove građene u posljednjih desetak godina taj omjer oko 0,50. Ipak, zaključeno je da omjer prosječno korištene i instalirane snage pomoćnog postrojenja iznosi 0,35 za sve ro-ro putničke brodove, a taj je zaključak i prihvaćen bez primjedbi na sjednici MEPC-a [53]. Stoga nije neobično što se proračun *EEDI referentne krivulje* za ro-ro putničke brodove, temeljen na spomenutoj metodologiji, nije pokazao uspješan.

Opširna studija je provedena s ciljem određivanja *EEDI referentne krivulje* [43]. I ova studija nedvosmisleno utvrđuje da EEDI u svom trenutnom obliku nije primjenjiv za reguliranje energetske učinkovitosti ro-ro putničkih brodova. Uključivanjem brzine kao kriterija pri određivanju *EEDI referentne krivulje* dobiveno je ograničeno statističko slaganje, no samo za brodove iznad 15.000 GT. Uvođenjem raznoraznih korekcijskih faktora moguće je dobiti iznimno statističko slaganje između EEDI-a postojeće flote i *EEDI referentne krivulje* [54]. Međutim, uvođenjem tih faktora, EEDI zapravo postaje varijabla koja statistički predviđa otpor broda. Takav korigirani EEDI analizira samo porivni sustav, a zanemaruje ostale potrošače u BES-u. Stoga je jasno da tako definiran EEDI više nije nikakva mjera energetske učinkovitosti te njegova primjena nema smisla.

Kako bi se mogao predložiti novi pristup ocjeni energetske učinkovitosti brodova, u ovome poglavlju provest će se analiza utjecajnih faktora na energetska učinkovitost i ekološku prihvatljivost postojeće flote ro-ro putničkih brodova. Za analizu će biti korišteni podaci iz IHS Fairplay „World Register of Ships“ (WROS) baze podataka, Slika 22. Također će biti uzete u obzir i smjernice za proračun *EEDI referentne krivulje* [34]. Prema tim smjernicama u analizu bi trebali biti uključeni brodovi isporučeni između 1. siječnja 1998. i 1. siječnja 2010. čija je bruto tonaža 400 ili više, a čiji je tip označen kodovima A36A2PR, A36A2PT, A36B2PL. Dostupna WROS baza podataka sadrži tehničke karakteristike brodova isporučenih do kolovoza 2015. Stoga će biti provedene dvije analize: prva za vremenski period prema smjernicama MEPC-a, a druga za zadnjih 15 godina, tj. od 15. kolovoza 2000. do 15. kolovoza 2015.

WROS baza podataka je najopsežnija baza s tehničkim karakteristikama brodova iz cijeloga svijeta. Zbog tog je razloga u [34] i odabrana kao referentna baza. Međutim, i u ovoj bazi određeni podaci za pojedine brodove nedostaju ili su netočni. Brodovi, kojima nedostaju pojedini tehnički podaci važni za ovu analizu, bit će izuzeti iz analize.

The screenshot displays the 'Search for Ships' interface within the IHS Fairplay application. The window title is 'Search for Ships'. The interface includes a search bar at the top left and a navigation menu on the right. The main search area contains several input fields for ship details: Ship name, Include Ex names, Any ex-name, Original Name, Photo on Web, Call Sign, Fairplay Number, LR/IMO No, Official Number, MMSI Number, and Pennant Number. A 'Ship Population' dropdown is set to 'Both'. Below these fields is a horizontal menu with tabs: Main, Construction, Ship Type, Dimensions, Engine, Liquid, Dry & Other, Survey Dates, History, Detentions, Fixtures, Client, Casualty, JFS Narratives, and Advanced. The 'Ship Type' tab is active, showing a 'Ship Type Code' field with the value 'A36A2PR, A36A2PT, A36B2PL'. Below this is a 'Ship Type' dropdown menu with the following options: 'Passenger/RoRo Ship (Vehicles)', 'Passenger/RoRo Ship (Vehicles/Rail)', and 'Passenger/Landing Craft'. There is also a 'Ship Type Grouping' field. Further down, there are sections for 'Jane's Fighting Ship Types' (Ship Class, Ship Type Abbreviation, Ship Section) and 'Legacy Fairplay Shiptype' (Multipick Sub Type, Multipick Main Type). At the bottom, the 'Fields to Display' section shows a list of fields: Vessel\_Name, Due\_or\_Delivered, LBP, Gt, Dwt, Engine\_Make, Engine\_Model, Engine\_Number\_of, Engine\_KW\_Total, Engine\_RPM. The 'Display Order' is set to 'Vessel\_Name' and 'Ascending'. The 'Display Page' is set to 'Registration'. Buttons for 'Save As Filter', 'Close', 'Search', 'Recall Filter', 'Clear Search', and 'Display Fields' are located at the bottom right.

Slika 22 Grafičko sučelje WROS baze podataka [51]

4.2.1.1. *Analiza tehničkih značajki flote ro-ro putničkih brodova u vremenskom periodu 1.1.1998. – 1.1.2010.*

WROS baza podataka sadrži sveukupno 629 brodova koji udovoljavaju prethodno navedenim kriterijima. Analizirani su brodovi za koje postoji podatak o ukupnoj snazi, brzini broda, kapacitetu u GT-u, brzini vrtnje motora, tipu propulzije, kapacitetu u DWT-u te duljini između okomica. Podaci o ukupnoj snazi, brzini broda i kapacitetu u GT-u su osnovni podaci potrebni za izračun *Postignutog EEDI*-a broda, dok su ostali podaci potrebni iz razloga:

- iz podatka o brzini vrtnje i snazi motora se može odrediti tip motora,
- ovisno o tipu propulzije i tipu motora može se zaključiti kako će se BES ponašati u različitim režimima opterećenja te procijeniti specifična potrošnja goriva motora,
- nosivost u DWT-u je potreban kako bi se moglo zaključiti koja je primarna namjena broda: prijevoz putnika ili prijevoz vozila,
- podatak o duljini između okomica je potreban kako bi se mogao odrediti Froudeov broj *Fr* te režim plovidbe pri različitim režimima opterećenja.

Nakon što se iz ukupnog skupa uklone brodovi za koje nedostaje potrebni podaci, preostaje 439 brodova. Zanimljivo je uočiti da za proračun *EEDI referentne krivulje* [32] nije potreban podatak o brzini vrtnje motora, kao ni o tipu propulzije, međutim potreban je podatak o istisnini. Zbog toga u proračun *EEDI referentne krivulje* ulazi samo 111 od ukupno 629 brodova, tj. svega 18%.

Tablica 11 Ukupan broj brodova s potrebnim podacima u razdoblju 1998.-2010.

Sadrži podatke o:	Broj brodova
Minimum (tip broda i vrijeme gradnje)	629
+ ukupna snaga	602
+ brzina broda	522
+ GT	522
+ brzina vrtnje motora	510
+ tip propulzije	465
+ DWT	453
+ duljina između okomica	439
Prema svim kriterijima [34]	111

### ***Podjela prema tipu motora***

Motori se, ovisno o brzini vrtnje, dijele na sporokretne, srednjokretne i brzokretne, poglavlje 3.2. Granica koja dijeli srednjokretne od sporokretnih i brzokretnih nije čvrsto postavljena. Općenito se sporokretnima smatraju motori čija je brzina vrtnje ispod 250 o/min, srednjokretnima čija je brzina vrtnje između 400 i 1100 o/min, a brzokretnima oni čija je brzina vrtnje iznad 1500 o/min. U postojećoj floti najviše brodova, njih 298, ima srednjokretne motore čija je brzina vrtnje između 428 i 1100 o/min.

7 brodova ima motore čija je brzina vrtnje 400 o/min ili manja. Od toga 6 brodova ima Semt-Pielstick-ove motore 8PC4 i 12PC4 serije. To su motori starije generacije i više se ne proizvode. Najsporije se vrti motor B&W na brodu „Regal Star“, i to pri 175 o/min. Taj je brod proizveden 1999. godine. Ovaj bi se motor smatrao sporokretnim, međutim ta se serija motora već i tada smatrala zastarjelom i već se dugo ne proizvodi. Stoga se ovih 7 brodova ne može smatrati relevantnim za određivanje reference te će iz daljnje analize biti izuzeti.

18 brodova ima motore čija je brzina vrtnje između 1100 o/min i 1500 o/min. To područje predstavlja svojevrsnu granicu između srednjokretnih i brzokretnih motora. Od toga 16 brodova ima MTU-ove motore serije 8000M i 1163TB. Ti motori imaju po 20 cilindara, brzina vrtnje im je od 1150 do 1275 o/min, a snaga od 300 do 400 kW po cilindru. Stoga se te motore može smatrati srednjokretnim motorima. Preostala 2 broda imaju Volvo i Mitsubishi motor ukupne snage 595, odnosno 691 kW po motoru. Ti motori se vrte na 1350 o/min, odnosno 1400 o/min te će biti smatrani brzokretnima.

Motore, čija je brzina vrtnje 1500 o/min ili viša, ima 116 brodova. Svi se ti motori u ovoj analizi smatraju brzokretnima.

Stoga će se ukupno analizirati 314 brodova sa srednjokretnim i 118 brodova s brzokretnim motorima.



### ***Podjela prema režimu plovidbe***

Režim plovidbe brodova je definiran Froudovim brojem:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g\nabla^{1/3}}} \quad (10)$$

pri čemu je:

$v$  ... brzina broda, m/s,

$g$  ... ubrzanje Zemljine sile teže, m/s<sup>2</sup>,

$\nabla$  ... istisnina broda, m<sup>3</sup>.

Kao što je i vidljivo, Tablica 11, malo je brodova za koje postoji podatak o istisnini, pa će u ovoj analizi umjesto istisnine koristiti podatak o duljini broda između okomica (perpendikulara)  $L_{PP}$ . Tako definirani Froudeovi brojevi neće dati jednake iznose, no cilj ove analize je ionako samo procijeniti režim plovidbe, a ne i otpor broda. Naime, brodovi, čiji Froudeov broj definiran prema istisnini iznosi do 1, plove u deplasmanskom režimu. To znači da u plovidbi ne postoji značajna razlika između gaza broda na pramcu i na krmi. Brodovi, čiji Froudeov broj iznosi između 1 i 3 plove u poludeplasmanskom režimu plovidbe. U tom režimu je karakteristično smanjenje gaza broda na pramcu, a povećanje gaza na krmi. Povećanjem brzine, a time i Froudeovog broja iznad 3, brod prelazi u gliserski režim plovidbe, pri čemu pramac broda u potpunosti izranja iz vode. Prema WROS bazi podataka, ukupno 350 brodova plovi u deplasmanskom režimu plovidbe, 82 u poludeplasmanskom, dok nijedan brod ne plovi u gliserskom režimu.

### ***Podjela prema tipu propulzijskog sustava***

Promatrani ro-ro putnički brodovi imaju raznovrsne propulzijske sustave. Najviše (njih 203) koristi vijak s upravljivim usponom (CPP). CPP je znatno kompliciranije izvedbe i skuplji, no nudi mogućnost mijenjanja karakteristike brodskog propulzora. Time se znatno povećavaju manevarske sposobnosti broda, a i smanjuje potrošnja goriva jer motor može raditi u povoljnijem radnom području. Ipak, unatoč brojnim prednostima CPP-a za ro-ro putničke brodove, 63 broda koriste vijak s fiksnim usponom (FPP). To su uglavnom stariji brodovi, međutim i poneki novi brodovi, koji nemaju izražene zahtjeve za manevarskim sposobnostima, koriste FPP.

Tablica 12 Broj brodova prema kriterijima u razdoblju 1998.-2010.

	deplasmanski ( $Fr < 1$ )		poludeplasmanski ( $Fr > 1$ )	
	Srednjokretni	Brzokretni	Srednjokretni	Brzokretni
CPP	196	3	-	4
FPP	35	24	-	4
Vodomlazni	-	2	50	24
Voith-Schneider	3	8	-	-
Azimutni	20	40	-	-
Azipodni	10	8	-	-
Ostalo	-	1	-	-
<b>Ukupno</b>	<b>264</b>	<b>86</b>	<b>50</b>	<b>32</b>

#### *4.2.1.2. Analiza tehničkih značajki flote ro-ro putničkih brodova u vremenskom periodu 1.8.2000. – 1.8.2015.*

Vremenski period promatran u prethodnom poglavlju je bio definiran prema [34]. To razdoblje je uzeto u obzir jer su u vrijeme donošenja navedene rezolucije bili dostupni podaci do 1. siječnja 2010. Trenutno dostupna WROS baza podataka sadrži tehničke karakteristike brodova izgrađenih do 1. kolovoza 2015. Ti noviji podaci su relevantniji za određivanje referentnog stanja postojeće flote. U tom razdoblju WROS baza podataka sadrži sveukupno 764 broda koji udovoljavaju navedenim kriterijima.

Nakon što se iz tog skupa uklone brodovi za koje nedostaju potrebni podaci, preostaju 442 broda, Tablica 13.

Tablica 13 Ukupan broj brodova s potrebnim podacima u razdoblju 2000.-2015.

Sadrži podatke o:	Broj brodova
Minimum (tip broda i vrijeme gradnje)	764
+ ukupna snaga	721
+ brzina broda	563
+ GT	563
+ brzina vrtnje motora	555
+ tip propulzije	471
+ DWT	460
+ duljina između okomica	442

#### ***Podjela prema tipu motora***

Motori su i u ovom slučaju podijeljeni u ovisnosti o brzini vrtnje. U postojećoj floti najviše brodova, njih 292, ima srednjokretne motore čija je brzina vrtnje između 428 i 1100 o/min.

4 broda ima motore čija je brzina vrtnje 400 o/min ili manja, i svi imaju Semt-Pielstick-ove motore 8PC4 i 12PC4 serije. Kao što je u prethodnom slučaju objašnjeno, ovi brodovi se ne mogu smatrati relevantnim za određivanje reference te će iz daljnje analize biti izuzeti.

16 brodova ima motore čija je brzina vrtnje između 1100 o/min i 1500 o/min. Slično kao i u prošlom skupu, 12 brodova ima MTU-ove motore serije 8000M i 1163TB. Ti motori imaju po 20 cilindara, brzina vrtnje im je od 1150 do 1275 o/min, a snaga od 300 do 400 kW po

cilindru. Stoga će se i u ovom slučaju ti motori smatrati srednjokretnim motorima. Preostala 4 broda imaju Volvo, Mitsubishi i Caterpillar motore snage 595, 691 i 578 kW po motoru, dok jedan brod ne sadrži podatke o motoru. Stoga će ti motori biti smatrani brzokretnima, dok će brod za koji ne postoji podatak o motoru biti izuzet iz daljnje analize.

Motore, čija je brzina vrtnje 1500 o/min ili viša, ima 130 brodova. Svi se ti motori u ovoj analizi smatraju brzokretnima.

Stoga će se ukupno analizirati 304 broda sa srednjokretnim i 133 brodova s brzokretnim motorima.

### ***Podjela prema režimu plovidbe***

Kako je već objašnjeno, režim plovidbe je definiran Froudeovim brojem. I u ovome slučaju će za definiranje Froudeovog broja umjesto istisnine biti korišten podatak o duljini broda između okomica (perpendikulara)  $L_{PP}$ . Prema WROS bazi podataka, ukupno 384 broda plovi u deplasmanskom režimu plovidbe, 53 u poludeplasmanskom, dok nijedan brod ne plovi u gliserskom režimu.

### ***Podjela prema tipu propulzijskog sustava***

Promatrani ro-ro putnički brodovi imaju raznovrsne propulzijske sustave. I u ovome slučaju najviše (njih 218) koristi vijak s upravljivim usponom (CPP). Zanimljivo je da u ovome vremenskom razdoblju više brodova koristi azimutni propulzor od FPP-a. To pokazuje novi trend kod ro-ro putničkih brodova. Glavna značajka azimutnih propulzora, Slika 23, su izvanredna manevarska svojstva. Budući da je ta značajka veoma bitna za ro-ro putničke brodove, nije neobično da se kod sve više novih brodova pribjegava takvim rješenjima. Slično kao i u prethodnom skupu brodova, gotovo svi brodovi koji plovi u poludeplasmanskom režimu imaju vodomlazne propulzore.

Tablica 14 Broj brodova prema kriterijima u razdoblju 2000.-2015.

	deplasmanski ( $Fr < 1$ )		poludeplasmanski ( $Fr > 1$ )	
	Srednjokretni	Brzokretni	Srednjokretni	Brzokretni
CPP	212	4	-	2
FPP	23	32	-	-
Vodomlazni	-	2	30	21
Voith-Schneider	3	11	-	-
Azimutni	23	49	-	-
Azipodni	13	10	-	-
Ostalo	-	2	-	-
<b>Ukupno</b>	<b>274</b>	<b>110</b>	<b>30</b>	<b>23</b>
	<b>384</b>		<b>53</b>	



Slika 23 Azimutni propulzor [55]

#### 4.2.1.3. *Mogućnosti korištenja alternativnih goriva*

U BES-ima se najčešće koristi teško gorivo (eng. *Heavy Fuel Oil* - HFO) s masenim udjelom sumpora do 3,5% kako je i propisano MARPOL-om (prije stupanja na snagu te odredbe MARPOL-a gorivo je imalo i do 5% sumpora). To je gorivo „prljavo“, zahtijeva posebnu pripremu, a produkti izgaranja su veoma opasni za okoliš, ali i za sam BES. Međutim, to je gorivo najjeftinije pa se stoga najčešće koristi. Uvođenjem nove regulative u okviru MARPOL-a brodovi koji koriste ovo gorivo više ne mogu udovoljiti najstrožim zahtjevima pa stoga sve češće koriste ili lako dizelsko gorivo (eng. *Marine Diesel Oil* - MDO) ili neko od alternativnih goriva, kao npr. ukapljeni prirodni plin ili vodik.

##### ***Ukapljeni prirodni plin (LNG)***

Ukapljeni prirodni plin (eng. *Liquefied Natural Gas* - LNG) je smjesa raznih kemijskih spojeva, no većinu čini metan ( $\text{CH}_4$ ). LNG se pokazao prikladnim za korištenje u brodskim motorima s unutarnjim izgaranjem. U [56] je dana detaljna analiza raznih vrsta goriva za teretne brodove, a prednost je dana upravo LNG-u. Korištenjem LNG-a kao goriva moguće je smanjenje emisija  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}_2$  i PM redom za 98%, 86%, 25% i 96% [57].

LNG kao pogonsko gorivo je posebno prikladno za korištenje u brodovima za prijevoz LNG-a gdje, zbog tehnologije skladištenja plina (pri atmosferskom tlaku i temperaturi  $-162\text{ }^\circ\text{C}$ ), postoji otparak koji se, umjesto ponovnog ukapljivanja, može koristiti za pogon motora [58]. Ipak, trenutno veći dio LNG flote brodova koristi dizelske motore ili parne turbine [59] kao primarne energetske izvore i mehanički propulzijski lanac. Samo manji broj brodova koristi motore prilagođene za rad i na teško gorivo i na LNG (eng. *dual-fuel engine*), a proizvođači nude već i motore prilagođene za rad i na teško i na lako gorivo i na LNG (eng. *tri-fuel engine*). Iako je period korištenja ovih tipova motora prekratak za donošenje konačnih zaključaka, prva iskustva su pozitivna. Ona pokazuju da su intervali održavanja motora produljeni, životni vijek komponenata dulji, unutrašnjost cilindara čišća, a talog produkata izgaranja i u ulju i u ispuhu manje [14]. Nadogradnja postojećih motora za korištenje LNG-a nije prezahtjevna, a LNG je trenutno bitno jeftiniji od dizelskih goriva. Emisije  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  i  $\text{SO}_x$  spojeva LNG-a su bitno manje te udovoljavaju Tier III zahtjevima [60]. Na svjetskoj razini trenutno ne postoji dovoljno dobro razvijena mreža dobavljača LNG-a, no LNG se već koristi u pojedinim područjima u brodovima za obalnu plovību [3].

## ***Vodik***

Kao moguća alternativa teškom gorivu nudi se i vodik. Vodik je najjednostavnije koristiti u gorivnom članku gdje se kemijska energija goriva izravno pretvara u istosmjernu električnu energiju [61]. Iako je tehnologija gorivnih članaka na visokoj razini, veliki su nedostaci nerazvijena mreža dobavljača, kao i problemi skladištenja i transporta vodika.

Kao alternativa opet se nudi korištenje LNG-a kao goriva. Za razliku od dizelskih motora i plinskih turbina korisnost gorivnog članka pri smanjenom opterećenju raste, no odziv na brze promjene opterećenja (pri manevriranju) mu je spor pa se često koristi u kombinaciji sa skladištenjem energije (npr. uz primjenu elektrokemijskih baterija) [14]. Stoga gorivni članak ima veliki potencijal za korištenje u IES-ima [6], Slika 3.

#### 4.2.1.4. Mogućnosti implementacije inovativnih energetski učinkovitih tehnologija

Prema [40] inovativne energetski učinkovite tehnologije je naziv za skup tehnologija podijeljenih u tri kategorije: A, B i C.

Kategorija A obuhvaća tehnologije koje mijenjaju krivulju otpora broda, tako da brod može postići projektnu brzinu pri manjoj snazi porivnog sustava. Kategorija obuhvaća sustave i tehnologije koji su nedjeljivi od broda, kao npr. optimizaciju trupa i propelera, premaze sa smanjenim faktorom trenja i sl.

Kategorija B obuhvaća tehnologije koje također smanjuju potrebnu snagu za postizanje projektne brzine, uz razliku što je ove tehnologije moguće isključiti. Tehnologije u ovoj kategoriji je moguće dodatno podijeliti na tehnologije B-1, koje su dostupne uvijek, kao npr. zračno podmazivanje podvodnog dijela trupa, i na tehnologije B-2, koje su samo ponekad dostupne, kao npr. jedra.

Kategorija C obuhvaća tehnologije koje proizvode električnu energiju. I ovdje je te tehnologije moguće podijeliti na tehnologije C-1, koje su uvijek dostupne, kao npr. utilizacija ispušnih plinova prvopokretača, i na tehnologije C-2, koje su samo ponekad dostupne, kao npr. fotonaponski članci. Ova podjela je prikazana i tablično, Tablica 15. Kao što je vidljivo inovativnim energetski učinkovitim tehnologijama se smatraju i tehnologije koje koriste obnovljive izvore energije.

Tablica 15 Kategorije inovativnih energetski učinkovitih tehnologija [40]

Inovativne energetski učinkovite tehnologije				
Smanjenje snage glavnih motora			Proizvodnja električne snage	
Kategorija A	Kategorija B-1	Kategorija B-2	Kategorija C-1	Kategorija C-2
Ne može se odvojiti od broda (ne može se isključiti)	Mogu se promatrati odvojeno od broda (mogu se isključiti)		Uvijek dostupna $f_{eff} = 1$	Ovisi o okolini $f_{eff} < 1$
	Uvijek dostupna $f_{eff} = 1$	Uvijek dostupna $f_{eff} < 1$		
- premazi - optimizacija trupa - optimizacija propelera	- tehnologija zračnog podmazivanja	- jedra	- sustav utilizacije otpadne topline	- fotonaponski članci



Sustavi koji koriste obnovljive izvore energije (vjetar i sunce) ne proizvode štetne spojeve u eksploataciji, te su u današnje vrijeme sve strožih zahtjeva za smanjenje emisija štetnih spojeva veoma zanimljivi. Međutim, treba naglasiti da utjecaj tih sustava na okoliš nije zanemariv, posebice u fazi proizvodnje i uporabe. Također, nedostatak tih sustava je da energija iz tih izvora nije uvijek dostupna. Stoga je do sada njihova uloga bila ograničena na pomoć porivnom sustavu (jedrima) ili proizvodnju električne energije (vjetroturbinama ili fotonaponskim ćelijama). Kod konvencionalnih BES-a obnovljivi izvori energije do sada nisu bitno doprinosili povećanju energetske učinkovitosti.

U [62] je prikazana studija utjecaja obnovljivih izvora energije na ro-ro putnički brod namijenjen za plovidbu u Jadranu. Sustavi koji koriste obnovljive izvore energije su promatrani s tri gledišta: povećanja energetske učinkovitosti, smanjenja EEDI-a i smanjenja emisije CO<sub>2</sub>. Promatrani su bili vjetroagregati i fotonaponski članci. Kao zaključak se navodi da je korisnost navedenih sustava veoma malena, no, budući da koriste obnovljive izvore energije, to i nije od presudne važnosti. Smanjenje emisije CO<sub>2</sub> koje je moguće ostvariti zahvaljujući tim sustavima iznosi oko 6% za vjetroagregate, odnosno oko 4% za fotonaponske članke u ljetnim mjesecima. Posebno treba napomenuti da prema trenutnoj metodologiji proračuna *Postignutog EEDI-a* korištenjem tih inovativnih energetski učinkovitih tehnologija *Postignuti EEDI* bi se smanjio svega za 4% (za vjetroagregate), odnosno oko 1% (za fotonaponske članke). Iz te se analize može zaključiti da trenutna metodologija proračuna *Postignutog EEDI-a* ne valorizira inovativne energetski učinkovite tehnologije na ispravan način i, što je još važnije, time ne potiče uvođenje tih tehnologija.

Također treba napomenuti da je korištenjem inovativnih energetski učinkovitih tehnologija kod IES-a moguće značajnije povećanje ukupne energetske učinkovitosti jer je bitno olakšano integriranje takvih „povremenih“ izvora energije u postojeći BES.

#### 4.2.1.5. *Mogućnosti primjene ostalih energetske alternativa*

U pojedinim slučajevima, posebno za brza plovila, koriste se i plinske turbine zbog velike gustoće snage. Njihova mala masa daje im prednost pri smještaju na brod, posebno u IES-u. No, veliki im je nedostatak veća specifična potrošnja goriva zbog niže termičke korisnosti. Također često zahtijevaju čistije, a time i skuplje gorivo, a snaga im značajno ovisi o uvjetima okoliša [63]. Korištenjem ukapljenog prirodnog plina kao pogonskog goriva moguće je dodatno ohladiti zrak na ulazu u turbinu te povećati snagu i korisnost turbine [14]. U kombiniranim ciklusima (tipično s parnom turbinom) moguće je još dodatno povećati ukupnu korisnost BES-a [64].

Na brodovima velikih snaga izazov je i pretvorba i prijenos električne energije jer je potrebna veća količina bakrenih vodiča što povećava masu, volumen, a i cijenu. Stoga se kao alternativa javljaju supravodljivi materijali [15] čija je gustoća struje koju mogu provesti ( $30.000 \text{ A/cm}^2$ ) bitno veća od bakra ( $350 \text{ A/cm}^2$ ) [65]. Prednost ima i korištenje istosmjerne struje jer vodiči koji prenose izmjeničnu struju imaju značajne gubitke zbog histereze i vrtložnih struja induciranih u okolnim materijalima [66]. Osim toga, i korisnost električnih strojeva u kojima su korišteni supravodljivi materijali je veća, čak do 99% [14].

#### 4.2.2. Analiza energetske i ekološke značajke flote ro-ro putničkih brodova

Kao što je već objašnjeno, najveći utjecaj broda na okoliš je pri radu BES-a. Prema napravljenoj analizi postojeće svjetske flote brodova u ovom poglavlju, vidljivo je da su svi ro-ro putnički brodovi pokretani srednjokretnim ili brzokretnim dizelskim motorima. Štetne emisije tih motora mogu se odrediti na temelju dozvoljenih granica i prosječne specifične potrošnje goriva, Tablica 16.

Tablica 16 Specifične emisije štetnih spojeva brodskih motora

	g CO <sub>2</sub> /kWh	g SO <sub>2</sub> /kWh	g NO <sub>x</sub> /kWh
Sporokretni (100 o/min), <i>SFOC</i> = 170 g/kWh , teško gorivo (3,5% S), udovoljava Tier II	529	11,9	14,4
Srednjokretni (500 o/min), <i>SFOC</i> = 190 g/kWh , lako gorivo (1% S), udovoljava Tier II	599	3,8	10,5
Brzokretni (2100 o/min), <i>SFOC</i> = 210 g/kWh , plavi dizel (0,1% S), udovoljava Tier II	673	0,42	7,7

Specifična potrošnja goriva ovisi o parametrima motora i radnoj točki (kombinacija opterećenja i brzine vrtnje). U ovome istraživanju će se koristiti prosječne vrijednosti na temelju podataka dostupnih u literaturi za karakteristične radne točke, Tablica 17.

Tablica 17 Specifična potrošnja goriva, g/kWh

		rad prema krivulji brodskog vijka				rad u generatorskom režimu			
Opterećenje	100%	75%	50%	25%	10%	75%	50%	25%	10%
Brzina vrtnje	100%	91%	80%	63%	46%	100%	100%	100%	100%
Srednjokretni motori	190	180	190	205	260	185	195	230	280
Brzokretni motori (glavni)	225	215	225	240	300	220	230	260	320
Brzokretni motori (pomoćni)	230	-	-	-	-	225	235	270	340

Osim štetnih emisija nastalih pri radu BES-a, brod utječe na okoliš i tijekom proizvodnje i reciklaže. Provođenje detaljnih analiza cjeloživotnog utjecaja na okoliš (eng. *Life Cycle*

*Analysis – LCA*) za svaku moguću konfiguraciju BES-a bi bio izuzetno zahtjevan posao. Stoga će u okviru ovoga doktorata biti iskorišteni podaci LCA pojedinih elemenata i sustava koji mogu biti korišteni u BES-ima.

U [20] su dani rezultati cjeloživotne analize kamionskih motora. U analizi su uspoređeni novi brzokretni dizelski motor te prerađeni motor na LNG. Rezultati su dani u apsolutnim iznosima, Tablica 18, a za potrebe ovog istraživanja ti su rezultati svedeni po kWh energije, Tablica 19. Treba primijetiti da je u ovom slučaju većina emisije CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> i SO<sub>2</sub> spojeva nastala tijekom faze eksploatacije. Emisije SO<sub>2</sub> su u oba slučaja veoma niske jer i dizelsko gorivo i LNG imaju malen maseni udio sumpora.

Tablica 18 Emisije štetnih spojeva kamionskih motora [20]

	Novi dizelski motor		Prerađeni LNG motor	
	Eksploatacija, kg	Ukupno, kg	Eksploatacija, kg	Ukupno, kg
CO <sub>2</sub>	225.000	230.000	192.000	194.000
SO <sub>2</sub>	173	188	77,7	91,9
NO <sub>x</sub>	634	644	114	139

U radu je analiza provedena za pretpostavljenu ukupnu količinu goriva potrošenu u životnom vijeku motora. Uz pretpostavku prosječne specifične potrošnje goriva  $SFC = 230 \text{ g/kWh}$ , određeno je da je u životnom vijeku motora proizvedena energija:

$$E = \frac{m}{SFOC} = \frac{63.750 \text{ kg}}{230 \text{ g/kWh}} = 277 \text{ MWh}$$

iz čega dijeljenjem podataka o ukupnoj emisiji s tom proizvedenom energijom slijedi specifična emisija štetnih plinova, Tablica 19.

Tablica 19 Specifične emisije štetnih spojeva kamionskih motora

	Novi dizelski motor		Prerađeni LNG motor	
	Eksploatacija, g/kWh	Ukupno, g/kWh	Eksploatacija, g/kWh	Ukupno, g/kWh
CO <sub>2</sub>	812	830	693	700
SO <sub>2</sub>	0,62	0,68	0,28	0,33
NO <sub>x</sub>	2,29	2,32	0,41	0,50

Ove rezultate se može usporediti s proračunom specifičnih emisija brodskih sporokretnih, srednjokretnih i brzokretnih motora, Tablica 16. Te su emisije određene na temelju specifične potrošnje goriva, koeficijenta pretvorbe goriva u CO<sub>2</sub> (Tablica 9), te uz pretpostavke da je sav sumpor oksidirao u SO<sub>2</sub> i da su emisije NO<sub>x</sub> spojeva najviše dopuštene prema Tier II pravilima (Slika 8).

Vidljivo je da su emisije CO<sub>2</sub> brodskih motora u usporedbi s kamionskim motorima nešto niže, jer je niža i specifična potrošnja goriva. Zbog toga je očekivano viša emisija NO<sub>x</sub> spojeva brodskih motora. Također, jer brodski motori u pravilu koriste gorivo s većim sadržajem sumpora i rezultirajuće emisije SO<sub>x</sub> spojeva su veće. Posebno treba naglasiti da su korištenjem LNG-a kao pogonskog goriva smanjene emisije svih štetnih plinova, a najviše NO<sub>x</sub> spojeva čija je emisija smanjena za više od 80%.

Posebno su zanimljive cjeloživotne analize utjecaja na okoliš inovativnih energetske učinkovitih tehnologija: gorivni članci, fotonaponski članci, vjetroagregati i nuklearna postrojenja. Jedna takva usporedna analiza cjeloživotnog utjecaja na okoliš dizelskog motora i gorivnog članka dana je u [21]. U tom radu pretpostavljeno je da gorivni članak (tip MCFC) koristi kao pogonsko gorivo vodik dobiven reformiranjem iz metana. Rezultati analize prikazani su tablično, Tablica 20. Zanimljiv je rezultat rada koji pokazuje da su emisije CO<sub>2</sub> gorivnog članka veće od dizelskog motora. Tijekom faze eksploatacije emisije NO<sub>x</sub> i SO<sub>x</sub> spojeva gorivnog članka su zanemarive u odnosu na dizelski motor. I na cjeloživotnoj razini te su emisije bitno manje, no ne toliko da bi se mogle smatrati zanemarivima.

Tablica 20 Specifične emisije štetnih plinova tijekom faze eksploatacije [21]

Emisija	Gorivni članak, g/kWh		Dizelski motor, g/kWh	
	Eksploatacija	Ukupno	Eksploatacija	Ukupno
CO <sub>2</sub>	913,8	1040	615	622,7
NO <sub>x</sub>	0,023	0,59	11,06	11,39
SO <sub>2</sub>	0	0,81	2,37	2,53

U [67] je dana analiza cjeloživotnog utjecaja na okoliš fotonaponskih članaka i nuklearnog postrojenja. Pretpostavljeno je da su obje tehnologije proizvedene i smještene u SAD-u, pri čemu je uzeto u obzir da fotonaponski članci mogu biti smješteni na lokacijama uz različitu insolaciju. Ta je analiza ograničena na emisije stakleničkih plinova, pa su rezultati i dani kao specifična ekvivalentna emisija CO<sub>2</sub>, Tablica 21.

Tablica 21 Specifična ekvivalentna emisija CO<sub>2</sub> fotonaponskih članaka i nuklearnog postrojenja [67]

	Emisija g CO <sub>2</sub> -eq/kWh
Fotonaponski članci (uz insolaciju 1800 kWh/m <sup>2</sup> godišnje)	22-49
Fotonaponski članci (uz insolaciju 2280 kWh/m <sup>2</sup> godišnje)	17-39
Nuklearno postrojenje	16-55

Fotonaponski članci i nuklearna postrojenja tijekom eksploatacije ne koriste goriva na bazi ugljika te stoga niti ne proizvode CO<sub>2</sub>. Ipak, promatrano na cjeloživotnoj razini njihova specifična emisija CO<sub>2</sub> nije zanemariva te bi se trebala uzeti u obzir pri određivanju ukupne emisije CO<sub>2</sub> broda.

U [68] je objavljena analiza cjeloživotnog utjecaja na okoliš dviju vjetroturbina: 1,8 MW izravno spojene na generator električne energije te 2,0 MW s mehaničkim prijenosnikom. Analiza je ograničena na emisije CO<sub>2</sub> za slučaj instalacije vjetroturbina u Meksiku. Specifična emisija CO<sub>2</sub> za manju turbinu iznosi 8,82 g CO<sub>2</sub> /kWh, a za veću 9,73 g CO<sub>2</sub> /kWh. Razlika je objašnjena time što veća turbina zahtijeva više materijala pri proizvodnji mehaničkog prijenosnika.

Na temelju ovoga pregleda može se zaključiti sljedeće:

1. emisije štetnih plinova dizelskih motora su najznačajnije tijekom eksploatacije i bitno ovise o opterećenju motora,
2. emisije štetnih spojeva inovativnih energetski učinkovitih tehnologija se moraju promatrati na cjeloživotnoj razini.

### 4.3. Metodologija proračuna *Postignutog EEDI-a*

Za određivanje energetske učinkovitosti broda uveden je EEDI s ciljem smanjenja emisije CO<sub>2</sub> s brodova. Kako bi se mogli usporediti *Postignuti EEDI* flote ro-ro putničkih brodova, MEPC je u formulu za proračun *Postignutog EEDI-a* uveo čitav niz korekcijskih faktora. Međutim, kako je vidljivo iz prijašnjeg izlaganja, taj se pokušaj pokazao neuspješnim jer, iako je usvojena *EEDI referentna krivulja* za ro-ro putničke brodove, ona ne daje ispravan prikaz utjecaja tih brodova na okoliš. Kako bi se mogao ispravno usporediti utjecaj različitih ro-ro putničkih brodova na okoliš, potrebno je najprije na ispravan način odrediti utjecaj pojedinog broda na okoliš.

#### 4.3.1. Metodologija proračuna *Postignutog EEDI-a* prema važećim propisima

U [62] je dan primjer proračuna *Postignutoga EEDI-a* za m/t „Juraj Dalmatinac“ (Slika 18). Tehničke karakteristike broda su prikazane tablično, Tablica 22. Kao što je vidljivo iz te tablice, ovaj brod ima azimutnu propulziju i jasno odvojen glavni sustav od pomoćnog postrojenja. Znači da brod nema IES. Budući da su mu svi prvopokretači dizelski motori, nema niti HES. Stoga je moguće primijeniti formulu za proračun *Postignutog EEDI-a* (7).

Rezultati proračuna su prikazani tablično, Tablica 23. Kao što je vidljivo iz tablice, a i iz brojnih drugih studija i radova navedenih u poglavlju 4.1.4, u ovom obliku EEDI ne daje podatak o emisiji CO<sub>2</sub> po tona-milji broda, budući da je emisija CO<sub>2</sub> u referentnim uvjetima gotovo tri puta veća. U stvarnim uvjetima, kada brod plovi po valovitom moru i nije nakrcan u potpunosti, emisija CO<sub>2</sub> po prevezenoj toni-milji je još i veća. Stoga vrijednost *Postignutog EEDI-a* nije niti prikazana u g CO<sub>2</sub>/t nm. Također je iz tablice vidljivo da je korisnost glavnih, odnosno pomoćnih motora vrijednošću i fizikalnim smislom sasvim različit od pojma EEDI-a i emisije CO<sub>2</sub>, kao što je već u nekoliko navrata naglašeno.

Tablica 22 Tehničke karakteristike m/t „Juraj Dalmatinac“ [62]

$L_{OA}$	87,6 m
$L_{PP}$	80,0 m
$B$	17,5 m
$T$	2,4 m
Broj putnika	1200
Broj vozila/kamiona	138/12
Bruto tonaža	3193
Brodogradilište i godina gradnje	Kraljevica/2007
Vrsta propulzije	Azimutna propulzija: 4 glavna motora spojena preko reduktora s 4 zakretna propelera s fiksnim usponom
Glavni motori	4xCaterpillar 3412 E DITA: 4x537 kW (B rating) pri 1800 o/min
Brzina na pokusnoj plovidbi	13 čv
Pomoćni motori	2xCAT 3406C: 2x229 kW pri 1500 o/min i 1xCAT 3056: 1x93 kW 1500 o/min
Ukupna instalirana snaga	2699 kW

Tablica 23 Rezultati proračuna EEDI-a [62]

<i>Postignuti EEDI</i>	83,41
<i>Zahtijevani EEDI (faza 1)</i>	70,47
Emisija CO <sub>2</sub> u referentnim uvjetima	217 g CO <sub>2</sub> /t nm
Korisnost glavnih motora u referentnim uvjetima	40,1%
Korisnost pomoćnih motora u referentnim uvjetima	37,3%



#### 4.3.2. Alternativna metodologija proračuna Postignutog EEDI-a

Trenutna metodologija određivanja *Postignutog EEDI-a* nije primjenjiva na IES-e. Stoga je u [42] prikazan alternativni pristup koji bi bio primjenjiv i za IES-e. Metodologija proračuna *Postignutog EEDI-a* u tom pristupu je općenitija i pojednostavljena. Formula za proračun „korigiranog“ *Postignutog EEDI-a* se može prikazati kao:

$$kor. EEDI = \frac{\sum_{i=1}^{nME} CO2_{ME,i} + \sum_{i=1}^{nAE} CO2_{AE,i} + \sum_{i=1}^n CO2_{OTHER,i} - \sum_{i=1}^n CO2_{RED,i}}{V_{ref} \cdot Kapacitet}, \text{ g CO}_2/\text{GT} \cdot \text{nm} \quad (11)$$

gdje su:

$CO2_{ME}$  emisija  $CO_2$  glavnih motora pri 75% maksimalne trajne snage prema  $NO_x$  tehničkom zapisniku, g  $CO_2$ /h,

$CO2_{AE}$  emisija  $CO_2$  pomoćnih motora pri 50% maksimalne trajne snage prema  $NO_x$  tehničkom zapisniku, g  $CO_2$ /h,

$CO2_{OTHER}$  emisija  $CO_2$  ostalih prvopokretača na brodu (kotlovi, incineratori itd.) pri referentnim uvjetima plovidbe, g  $CO_2$ /h,

$CO2_{RED}$  smanjenje emisije  $CO_2$  uslijed korištenja tehnologija koje inhibiraju proizvedeni  $CO_2$  (skladištenjem ili kemijskom pretvorbom), g  $CO_2$ /h,

*Kapacitet* ukupni kapacitet broda izražen kao bruto tonaža – GT.

Kao što je i vidljivo iz jednadžbe (11) sama struktura formule je slična trenutnoj formuli za određivanja *Postignutog EEDI-a* jer je *kor. EEDI* također mjeren u g  $CO_2$ /t nm. Međutim iz formule su izbačeni korekcijski faktori zbog kojih je EEDI i izgubio fizikalni smisao, a dodani su drugi izvori, kao i mogući ponori emisija  $CO_2$ . Time se predlaže cjeloviti (holistički) pristup promatranju BES-a, nasuprot trenutno važećem partikularnom pristupu. Sam postupak određivanja brojnika u *Postignutom EEDI-u* je pojednostavljen jer se izravno uvrštavaju podaci iz  $NO_x$  tehničkog zapisnika. U slučaju da za pojedine izvore ili ponore emisije  $CO_2$  ne postoji takav zapisnik, emisija  $CO_2$  se može i dalje izračunati posredno iz potrošnje goriva i faktora pretvorbe goriva u  $CO_2$ .

Posebno treba naglasiti da je u ovome „korigiranom“ *EEDI*-u *Kapacitet* izražen u bruto tonaži – *GT* (eng. *Gross Tonnage*), a ne u *DWT*-u. Razlog tome je što *DWT*, kao trenutno korištena mjera, ne prikazuje na ispravan način kapacitet ro-ro putničkih brodova. Naime, kod ro-ro putničkih (ali i ostalih) brodova *DWT* se računa kao razlika istisnine broda pri maksimalnom gasu i mase lakog broda (*LWT*). Budući da kapacitet ovih brodova nije ograničen masom putnika i tereta, već volumenom koji oni zauzimaju, brodovi koji imaju 100% popunjen kapacitet, najčešće nemaju maksimalni gas (uvjetovan kriterijima plovnosti i stabiliteta), a time niti maksimalni *DWT*. Teoretski bi se ro-ro putnički brodovi mogli koristiti i za prijevoz nekakvog osobito teškog tereta. U tom bi slučaju njihov kapacitet bio ograničen maksimalnim gasom, no u slučaju kada bi se ti brodovi koristili za takve svrhe (npr. u ratnom stanju), pitanje njihove energetske učinkovitosti i ekološke prihvatljivosti bi ionako bilo od sekundarnog značenja. Budući da se ti brodovi inače ne koriste za takve namjene, kao mjera za kapacitet je odabrana bruto tonaža. Bruto tonaža je bezdimenzijska mjera za volumen svih zatvorenih prostora na brodu. Definirana je kao:

$$GT = K \times V \quad (12)$$

pri čemu je:

$$K = 0,2 + 0,02 \times \log V \quad (13)$$

$V$  – volumen svih zatvorenih prostora na brodu, m<sup>3</sup>.

Ovakav pristup je uspoređen s metodologijom danom izrazom (7) koja je korištena za proračun *Postignutog EEDI*-a za slučaj da m/t „Juraj Dalmatinac“ ima IES – točnije dizel-električni BES. Tehničke karakteristike BES-a su navedene tablično, Tablica 24. Kao što se vidi iz tablice, brod ima tri dizelska motora za centraliziranu proizvodnju ukupno potrebe količine električne energije te elektromotornu propulziju. Prema predloženom pristupu ti se motori smatraju glavnima te im je referentno opterećenje 75%  $P_{MCR}$ , dok drugih izvora i ponora emisije CO<sub>2</sub> na tom brodu nema. Pretpostavljena je neizmijenjena referentna brzina.

Tablica 24 Tehničke karakteristike pretpostavljenog IES-a m/t „Juraj Dalmatinac“ [42]

Vrsta propulzije	Azimutna propulzija: 4 elektromotora spojena preko reduktora s 4 zakretna propelera s fiksnim usponom
Motori	3xCaterpillar C32: 3x875 kW pri 1500 o/min izravno spojeni na električne generatore
Ukupna instalirana snaga	2625 kW

Korištenjem takvog pristupa za proračun *Postignutog EEDI*-a i postojećeg (konvencionalnog) BES i predloženog IES-a dobiveno je da bi *Postignuti EEDI* broda s IES-om bio gotovo 10% veći od konvencionalnog BES-a. Iako je predloženi pristup omogućio proračun *Postignutog EEDI*-a i za IES-e, rezultat proračuna upućuje na to da metodologija ipak nije dobra jer se u praksi pokazalo da je energetska učinkovitost IES-a redovito veća ili barem jednaka u usporedbi s konvencionalnim BES-ima, tj. da IES-i redovito troše manje goriva i time imaju manju emisiju CO<sub>2</sub>.

#### 4.3.3. Predložena metodologija proračuna Postignutog EEDI-a

Analizom alternativne metodologije proračuna *Postignutog EEDI-a* opisane u prethodnom poglavlju, te korištenjem zaključaka iznesenih na temelju analize energetske i ekološke karakteristika postojećih BES-a, moguće je utvrditi razloge zbog kojih ovakav pristup ne daje ispravnu sliku utjecaja broda na okoliš. Naime, ovaj je pristup temeljen na trenutno važećoj metodologiji proračuna *Postignutog EEDI-a*. Prema njoj promatra se samo jedna radna (referentna) točka BES-a. Sama svrha uvođenja IES-a, a posebice dizel-električnog BES-a, je upravo omogućiti učinkovit rad BES-a u širokom radnom području. Međutim, njihova optimalna energetska učinkovitost (promatrana u samo jednoj radnoj točki) je u tom slučaju nešto niža. S druge strane, konvencionalni BES-i se upravo optimiraju za referentne uvjete. Stoga su u tim uvjetima oni redovito energetski učinkovitiji, no u uvjetima eksploatacije troše više goriva i imaju veću emisiju štetnih plinova.

Kako bi *Postignuti EEDI* dao ispravnu sliku utjecaja na okoliš broda u uvjetima eksploatacije, nužno je proširiti radno područje u kojemu se BES promatra. Za to je potrebno ili uvesti dinamičku energetske bilancu kako bi se simulirali uvjeti eksploatacije ili promatrati nekoliko specifičnih radnih točaka koje bi se ponderirale i čime bi se aproksimirali uvjeti eksploatacije, tzv. kvazistatička energetska bilanca.

Tradicionalni pristup promatranju opterećenja BES-a koristi tzv. kvazistatičku energetske bilancu. Prema njoj se potrebe za energijom pojedinih sustava ponderiraju u ovisnosti o učestalosti rada sustava, te zatim zbrajaju kako bi se odredila ukupna potreba BES-a za energijom, odnosno snagom. Ovakav pristup ima neke očite nedostatke, a to je prije svega nepreciznost te nemogućnost simuliranja tranzijentnih pojava, kao što su energetske potrebe BES-a prilikom ukapčanja pojedinih potrošača (naročito velikih snaga) i sl.

Uvođenje dinamičke energetske bilance, koja bi kontinuirano u određenom vremenskom periodu prikazala potrebe BES-a za određenom količinom i vrstom energije, omogućilo bi preciznije određivanje potreba BES-a. Međutim, metodologija određivanja dinamičke energetske bilance zahtijeva mnogo ulaznih parametara od svih potrošača na brodu. Budući da su potrošači energije na brodu mnogobrojni i raznovrsni, proces definiranja dinamičke energetske bilance za pojedini brod bi bio dugotrajan i mukotrpan. A ako bi se takav postupak htjelo primijeniti na čitavu flotu brodova, taj bi zadatak bio gotovo nemoguć zbog ogromne količine ulaznih podataka, koji za pojedine brodove vjerojatno i ne bi bili dostupni.

Stoga će u okviru ovoga doktorata biti korišten tradicionalni pristup, iako dijelom modificiran. Naime, tradicionalni pristup se ograničava samo na promatranje pojedinih stanja plovidbe sa svrhom definiranja maksimalnih potreba BES-a za energijom, odnosno snagom. To je bitno kako bi se mogli definirati potrebni kapaciteti BES-a za proizvodnju energije, odnosno kako bi se na temelju maksimalne potrebe za snagom mogla definirati ukupna snaga koju BES treba proizvesti. Kao što je i zaključeno u poglavlju 4.2.2, pri promatranju energetske učinkovitosti i ekološke prihvatljivosti BES-a u eksploataciji, potrebno je uzeti u obzir i stanja kada BES nije maksimalno opterećen. Za tu svrhu je moguće primijeniti pristup koji je korišten u NO<sub>x</sub> tehničkom zapisniku, gdje su za različite primjene dizelskih motora propisani faktori učestalosti opterećenja [23]. Ti su koeficijenti prikazani tablično (Tablica 25 – 28).

Tablica 25 Ispitni ciklus za motore namijenjene za pogon broda pri konstantnoj brzini vrtnje (dizel-električni BES-i i CPP) [23]

Ispitni ciklus E2	Brzina vrtnje	100%	100%	100%	100%
	Snaga	100%	75%	50%	25%
	Učestalost opterećenja	0,2	0,5	0,15	0,15

Tablica 26 Ispitni ciklus za motore namijenjene za pogon broda uz ovisnost brzine vrtnje o opterećenju prema krivulji brodskog propulzora [23]

Ispitni ciklus E3	Brzina vrtnje	100%	91%	80%	63%
	Snaga	100%	75%	50%	25%
	Učestalost opterećenja	0,2	0,5	0,15	0,15

Tablica 27 Ispitni ciklus za pomoćne motore uz konstantnu brzinu vrtnje [23]

Ispitni ciklus D2	Brzina vrtnje	100%	100%	100%	100%	100%
	Snaga	100%	75%	50%	25%	10%
	Učestalost opterećenja	0,05	0,25	0,3	0,3	0,1

Tablica 28 Ispitni ciklus za pomoćne motore uz promjenjivu brzinu vrtnje [23]

Ispitni ciklus C1	Brzina vrtnje	Nominalna				Srednja			Prazni hod
	Snaga	100%	75%	50%	10%	100%	75%	50%	0%
	Učestalost opterećenja	0,15	0,15	0,15	0,1	0,1	0,1	0,1	0,15

Treba ipak imati na umu da su faktori učestalosti opterećenja navedeni u NO<sub>x</sub> tehničkom zapisniku univerzalni za sve motore neovisno o tipu broda. Zbog mnogobrojnih specifičnosti ro-ro putničkih brodova, trebalo bi uzeti u obzir da stvarna prosječna opterećenja motora u pravilu ne odgovaraju navedenim faktorima. To se posebno odnosi na plovidbu pri maksimalnom opterećenju motora. Kako je već objašnjeno u poglavlju 4.2.1, glavni motori ro-ro putničkih brodova imaju određenu zalihu snage kako bi brod mogao postići željenu brzinu i pri teškom moru. Kao posljedica toga je da su u prosjeku motori ro-ro putničkih brodova podopterećeni, tj. da su većinu vremena pri plovidbi otvorenim morem opterećeni između 50% i 75% (ova pretpostavka jasno ne vrijedi ako je projekt broda promašen). Stoga nije ispravno pretpostaviti da su glavni motori 20% vremena opterećeni 100%.

Osim opterećenja u plovidbi otvorenim morem promatranih u ispitnim ciklusima E2 i E3, potrebno je dodati još i opterećenje tijekom plovidbe unutar luke. Plovidba unutar luke je u pravilu ograničena na 5 ili 2 čv te je pretpostavljeno da brod postiže te brzine u prosjeku s 10% snage glavnih motora. Iako su udaljenosti koje brod prelazi u akvatoriju luke veoma kratke, zbog male brzine plovidbe vrijeme koje provodi u tom području je značajno. Već je i spomenuto da je emisija štetnih plinova pri radu motora u luci posebno štetna za zdravlje ljudi. Stoga se u ovome istraživanju predlažu ispravljeni ispitni ciklusi E2 i E3, Tablica 29 i Tablica 30.

Tablica 29 Ispravljeni ispitni ciklus E2 za ro-ro putničke brodove

Korigirani ispitni ciklus E2	Brzina	100%	100%	100%	100%	100%
	Snaga	100%	75%	50%	25%	10%
	Učestalost opterećenja	0,05	0,25	0,25	0,15	0,3

Tablica 30 Ispravljeni ispitni ciklus E3 za ro-ro putničke brodove

Korigirani ispitni ciklus E3	Brzina	100%	91%	80%	63%	46%
	Snaga	100%	75%	50%	25%	10%
	Učestalost opterećenja	0,05	0,25	0,25	0,15	0,3

Na temelju podataka u tablicama moguće je definirati *Postignuti EEDI* na dva načina. U prvome slučaju za svaki brod bi se zapravo računalo pet EEDI-a definiranih pri pet karakterističnih stanja opterećenja motora za pogon broda, tj. pri 100%, 75%, 50%, 25% i 10% *MCR*:

$$EEDI_{100} = \frac{\sum_{i=1}^{nME} CO2_{ME100,i} + \sum_{i=1}^{nAE} CO2_{AE,i} + \sum_{i=1}^n CO2_{OTHER,i} - \sum_{i=1}^n CO2_{RED,i}}{V_{ref100} \cdot Kapacitet}, \text{ g CO}_2/\text{t} \cdot \text{nm} \quad (14)$$

$$EEDI_{75} = \frac{\sum_{i=1}^{nME} CO2_{ME75,i} + \sum_{i=1}^{nAE} CO2_{AE,i} + \sum_{i=1}^n CO2_{OTHER,i} - \sum_{i=1}^n CO2_{RED,i}}{V_{ref75} \cdot Kapacitet}, \text{ g CO}_2/\text{t} \cdot \text{nm} \quad (15)$$

$$EEDI_{50} = \frac{\sum_{i=1}^{nME} CO2_{ME50,i} + \sum_{i=1}^{nAE} CO2_{AE,i} + \sum_{i=1}^n CO2_{OTHER,i} - \sum_{i=1}^n CO2_{RED,i}}{V_{ref50} \cdot Kapacitet}, \text{ g CO}_2/\text{t} \cdot \text{nm} \quad (16)$$

$$EEDI_{25} = \frac{\sum_{i=1}^{nME} CO2_{ME25,i} + \sum_{i=1}^{nAE} CO2_{AE,i} + \sum_{i=1}^n CO2_{OTHER,i} - \sum_{i=1}^n CO2_{RED,i}}{V_{ref25} \cdot Kapacitet}, \text{ g CO}_2/\text{t} \cdot \text{nm} \quad (17)$$

$$EEDI_{10} = \frac{\sum_{i=1}^{nME} CO2_{ME10,i} + \sum_{i=1}^{nAE} CO2_{AE,i} + \sum_{i=1}^n CO2_{OTHER,i} - \sum_{i=1}^n CO2_{RED,i}}{V_{ref10} \cdot Kapacitet}, \text{ g CO}_2/\text{t} \cdot \text{nm} \quad (18)$$

Pri praznom hodu nije moguće definirati *EEDI*, jer je gospodarski učin u tom slučaju 0 pa *EEDI* teži u beskonačno. U drugome slučaju, na temelju ovako definiranih indeksa i uz primjenu faktora učestalosti opterećenja, mogao bi se definirati „prosječni“ *EEDI* broda.

U oba slučaja emisija CO<sub>2</sub> pomoćnih motora može se izračunati u ovisnosti o potrebama pomoćnog postrojenja za električnom energijom. U tu se svrhu izrađuju već spomenute „kvazistatičke“ energetske bilance čijim se ponderiranjem mogu odrediti karakteristična opterećenja pomoćnih motora. Alternativno, mogu se koristiti i karakteristična stanja opterećenja pomoćnih motora, Tablica 27, i pripadajuće emisije CO<sub>2</sub> prema izrazu:

$$\begin{aligned} CO2_{AE} &= f_{100} CO2_{AE100} + f_{75} CO2_{AE75} + f_{50} CO2_{AE50} + f_{25} CO2_{AE25} + f_{10} CO2_{AE10} \\ &= 0,05 CO2_{AE100} + 0,25 CO2_{AE75} + 0,3 CO2_{AE50} + 0,3 CO2_{AE25} + 0,1 CO2_{AE10} \end{aligned} \quad (19)$$

Osim ta dva pristupa, može se koristiti i empirijski izraz iz [34] za određivanje prosječno korištene snage pomoćnih motora:

$$P_{AE} = 0,866 \cdot GT^{0,732} \quad (20)$$

iz kojega se onda na temelju prosječne specifične potrošnje goriva i faktora pretvorbe goriva u CO<sub>2</sub> može odrediti emisija CO<sub>2</sub>. Ovako definirane emisije CO<sub>2</sub> ne moraju odgovarati u potpunosti stvarnim stanjima broda u plovidbi. To se posebice odnosi na IES-e s više raznovrsnih prvopokretača. Naime, kod njih se najčešće predviđa da se prvopokretače koristi na način da rade isključivo u svojem optimalnom režimu te se uključuju/isključuju ovisno o potrebama BES-a za energijom. Ovakve režime nije moguće jednoznačno predvidjeti za sve brodove. Stoga se kao univerzalno primjenjiv zahtjev nameće izračun *EEDI*-a pri karakterističnim stanjima opterećenja propulzora. Kod konvencionalnih BES-a ovakav pristup rezultira zapravo identičnim rezultatima jer su glavni motori imaju mehanički vezani s propulzorima. Međutim, kod IES-a ovakav zahtjev omogućuje variranje opterećenja prvopokretača u cilju povećanja njihove korisnosti, a time i povećanja ukupne energetske učinkovitosti i ekološke prihvatljivosti broda.

Na primjeru m/t „Juraj Dalmatinac“ ovakav pristup daje rezultate koji su zapravo očekivani u praksi, a dijelom su i izmjereni tijekom istraživanja. Energetska bilanca BES-a tog broda za pet karakterističnih stanja opterećenja propulzora je navedena tablično za konvencionalni BES, Tablica 31, kao i za IES, Tablica 34, te pripadajuća opterećenja prvopokretača. Vidljivo je da različiti pristupi definiranja potreba pomoćnog postrojenja za energijom daju različite rezultate. U ovome je primjeru pretpostavljeno opterećenje pomoćnih motora prema ispitnom ciklusu, Tablica 27, kao referentno (jer je i bliže stvarno mjerenom), kao što je prikazano, Tablica 32. Budući da nisu bili dostupni NO<sub>x</sub> tehnički zapisnici za stvarno korištene motore, pretpostavljena je specifična potrošnja goriva prema Tablica 17. U svim slučajevima je pretpostavljen faktor pretvorbe  $C_F = 3,2 \text{ g CO}_2 / \text{g goriva}$ .



Tablica 31 Opterećenje porivnog sustava za konvencionalni BES m/t „Juraj Dalmatinac“

	100%	75%	50%	25%	10%
Opterećenje propulzora, kW	2.105	1.579	1.053	526	210
Snaga glavnih motora (uz gubitke 2%), kW	2.148	1.611	1.074	537	215
Emisije CO <sub>2</sub> glavnih motora, kg/h [69]	1.549	1.110	775	413	207
Učestalost opterećenja	0,05	0,25	0,25	0,15	0,3
Ukupna prosječna emisija CO <sub>2</sub> glavnih motora, kg/h	673				

Tablica 32 Opterećenje pomoćnog postrojenja za konvencionalni BES m/t „Juraj Dalmatinac“

	100%	75%	50%	25%	10%
Učestalost opterećenja	0,05	0,25	0,3	0,3	0,1
Ukupno opterećenje pomoćnih motora, kW	551	413	276	138	55
Emisije CO <sub>2</sub> pomoćnih motora, kg/h [70]	406	297	208	115	57
Učestalost opterećenja	0,05	0,25	0,3	0,3	0,1
Ukupno prosječno opterećenje pomoćnih motora, kW	259				
Opterećenje pomoćnog postrojenja prema (20), kW	318				
Ukupna prosječna emisija CO <sub>2</sub> pomoćnih motora, kg/h	197				

Tablica 33 Proračun *EEDI*-a za konvencionalni BES m/t „Juraj Dalmatinac“

	100%	75%	50%	25%	10%
Emisija CO <sub>2</sub> glavnih motora, kg/h	1.549	1.110	775	413	207
Ukupna prosječna emisija CO <sub>2</sub> pomoćnih motora, kg/h	197				
Referentna brzina, čv	13	11,8	10,3	8,2	6,0
Gospodarski učin, GT nm	41.509	37.677	32.888	26.183	19.267
<i>Postignuti EEDI</i> , g CO <sub>2</sub> /GT nm	42,1	34,7	29,6	23,3	21,0
Sveukupna emisija CO <sub>2</sub> prvopokretača, kg/h	1.747	1.309	972	610	405
Sveukupna prosječna emisija CO <sub>2</sub> prvopokretača, kg/h	870				
Prosječni <i>Postignuti EEDI</i> , g CO <sub>2</sub> /GT nm	28,0				

Tablica 34 Energetska bilanca i *EEDI* za IES m/t „Juraj Dalmatinac“

	100%	75%	50%	25%	10%
Potrebe za mehaničkom energijom (Tablica 31), kW	2.105	1.579	1.053	526	210
Potrebe za električnom energijom za porivni sustav (uz gubitke 8%), kW	2.288	1.716	1.145	572	228
Potrebe za električnom energijom za pomoćno postrojenje, kW	259				
Ukupne potrebe za električnom energijom, kW	2.547	1.975	1.404	831	487
Ukupna snaga motora, kW	3x849	3x658	2x702	2x415	1x487
Ukupna emisija CO <sub>2</sub> , kg/h	1.837	1.393	990	613	359
Učestalost opterećenja	0,05	0,25	0,25	0,15	0,3
Referentna brzina, čv	13	11,8	10,3	8,2	6,0
Gospodarski učin, GT nm	41.509	37.677	32.888	26.183	19.267
<i>Postignuti EEDI</i> , g CO <sub>2</sub> /GT nm	44,3	37,0	30,1	23,4	18,6
Sveukupna prosječna emisija CO <sub>2</sub> prvopokretača, kg/h	887				
Prosječni <i>Postignuti EEDI</i> , g CO <sub>2</sub> /GT nm	28,1				

Usporedbom dobivenih rezultata, Tablica 33 i Tablica 34, vidljivo je da bi prosječne emisije CO<sub>2</sub> m/t „Juraj Dalmatinac“ s IES-om bile podjednake kao kod konvencionalnog BES-a. Pri tome se također može uočiti da je vrijednost *Postignutog EEDI*-a pri 100% i 75% opterećenja propulzora kod IES-a veća nego kod konvencionalnog, pri 50% i 25% opterećenja vrijednosti *Postignutog EEDI*-a su podjednake, dok je pri 10% opterećenja propluzora *Postignuti EEDI* za IES manji. Kod ro-ro putničkih brodova kod kojih potreba za snagom električnog postrojenja ima veći udio u ukupnoj snazi, IES-i bi se pokazali energetski učinkovitijima, tj. njihov *Postignuti EEDI* bi bio još manji u usporedbi s konvencionalnim BES-ima.

Na temelju ove analize predlaže se korištenje sljedećih vrijednosti specifične potrošnje goriva za ro-ro putničke brodove, Tablica 35, pri određivanju *Procijenjenog EEDI*-a za potrebe određivanja *referentnog EEDI*-a, odnosno u slučaju kada nisu dostupni točni podaci iz NO<sub>x</sub> tehničkog zapisnika.

Tablica 35 Specifična potrošnja goriva za ro-ro putničke brodove, g/kWh

Vrsta BES-a	Motor	EEDI <sub>100</sub>	EEDI <sub>75</sub>	EEDI <sub>50</sub>	EEDI <sub>25</sub>	EEDI <sub>10</sub>
S promjenjivom brzinom vrtnje, prema E3 (FPP)	Srednjokretni	190	185	190	205	260
	Brzokretni	225	215	225	240	300
S konstantnom brzinom vrtnje, prema E2 (IES, CPP)	Srednjokretni	190	185	185	185	190
	Brzokretni	225	220	220	220	225
Pomoćni BES	Brzokretni	225				

U slučaju da brod ima i druge izvore ili ponore emisije CO<sub>2</sub> osim dizelskih motora, potrebno je za svaki izvor ili ponor odrediti karakteristična stanja, kao i pripadajuće emisije. To se posebno odnosi na inovativne energetski učinkovite tehnologije kako je i prikazano u poglavlju 4.2.2.

Iz navedenoga je vidljivo da je predloženom metodologijom određivanja *Postignutog EEDI*-a moguće dati ocjenu energetske učinkovitosti IES-a. Kako bi se mogla ustvrditi univerzalna primjenjivost predloženog pristupa, potrebno ga je primijeniti na cijelu flotu ro-ro putničkih brodova, odnosno potrebno je odrediti *Zahtijevani EEDI*.

#### 4.4. Metodologija proračuna *Zahtijevanog EEDI-a*

Proračun *Zahtijevanog EEDI-a* sastoji se od određivanja vrijednosti *EEDI referentne krivulje* te faktora smanjenja  $X$ , kao što je to već bilo spomenuto u poglavlju 4.1.1. U ovome će poglavlju biti dan prijedlog alternativnog određivanja *Zahtijevanog EEDI-a* koji bi trebao dati ispravan prikaz stvarnog stanja trenutne flote te realne zahtjeve za poboljšanje energetske učinkovitosti novih brodova.

##### 4.4.1. *Trenutni pristup definiranja EEDI referentne krivulje*

*EEDI referentna krivulja* se određuje prema [32] i [34], kako je već i opisano. Međutim, određivanje *EEDI referentne krivulje* prema metodologiji danoj u tim smjernicama za ro-ro putničke brodove nije se pokazalo uspješnim u brojnim već spomenutim studijama jer očekivano statističko slaganje nije postignuto. Unatoč tome, MEPC je prema tim smjernicama usvojio *EEDI referentnu krivulju* pri tome ne dajući podatke javno o vrijednosti koeficijenta determinacije  $R^2$ .

Koeficijent determinacije  $R^2$  je bitan pokazatelj statističkog slaganja određenog skupa podataka s nekom pretpostavljenom funkcijom, a definiran je kao:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} \quad (21)$$

pri čemu je:

$$SS_{res} = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2 \quad (22)$$

$$SS_{tot} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (23)$$

uz:

$y_i$  ... vrijednost iz skupa podataka u točki  $i$ ,

$f(x_i)$  ... vrijednost funkcije u točki  $i$ ,

$\bar{y}$  ... prosjek svih vrijednosti iz skupa podataka.

Iz navedene definicije vidljivo je da koeficijent determinacije može poprimiti sljedeće karakteristične vrijednosti:

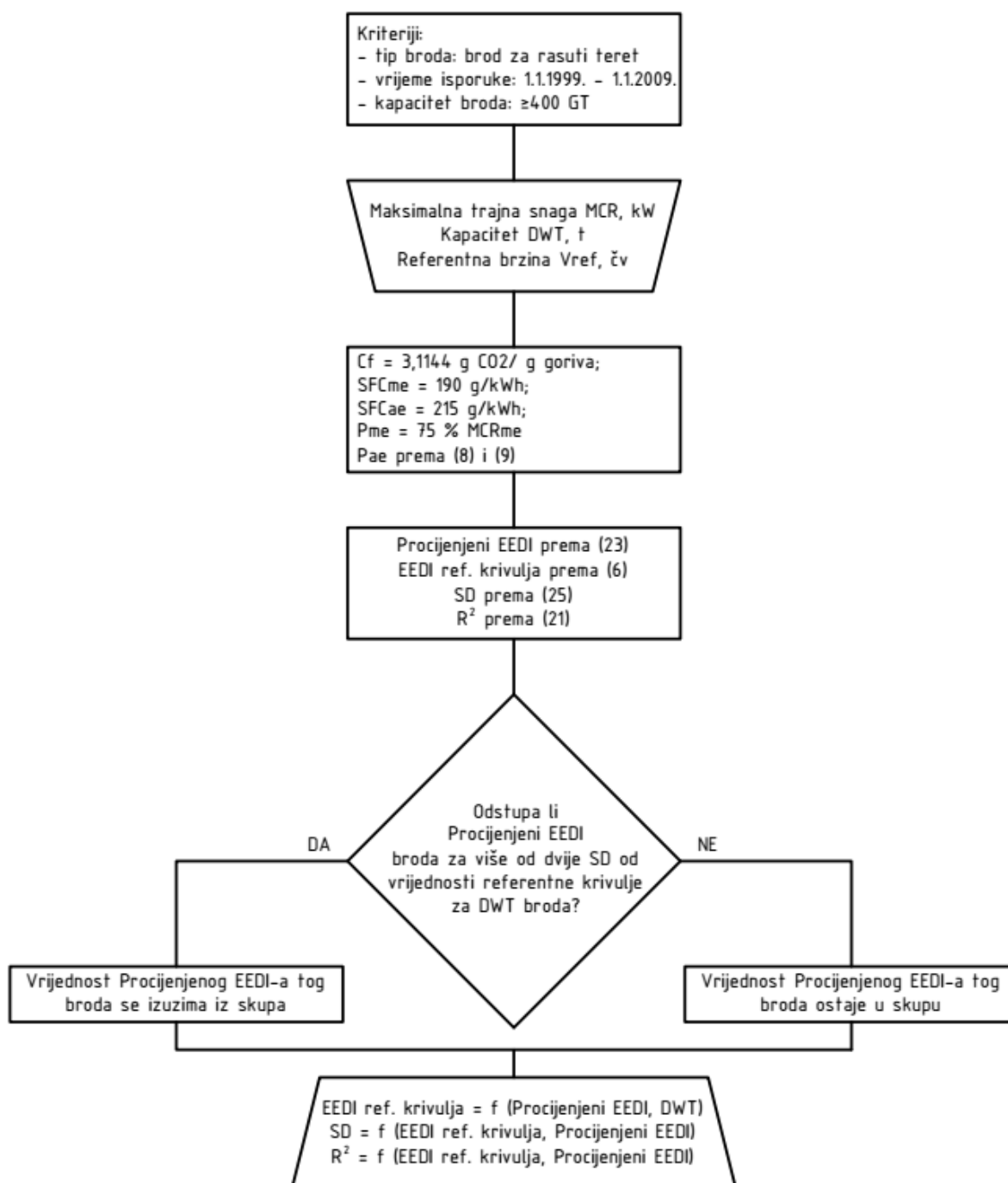
- $R^2 = 1$  – matematička povezanost; vrijedi  $y_i = f(x_i) \forall i \in \{1, n\}$ , tj. pretpostavljena funkcija se u potpunosti poklapa s korištenim skupom (ovdje se zapravo više ne govori o aproksimaciji, već o zakonu),
- $0,75 < R^2 < 1$  veoma dobra do izvrsna povezanost funkcije i skupa podataka,
- $0,5 < R^2 < 0,75$  umjerena do dobra povezanost funkcije i skupa podataka,
- $0,26 < R^2 < 0,5$  slaba povezanost funkcije i skupa podataka,
- $R^2 < 0,25$  nema povezanosti funkcije i skupa podataka.

Navedeni intervali nisu strogo definirani, no upućuju na značenje dobivenih vrijednosti koeficijenta determinacije. Ako je pretpostavljena funkcija toliko neprikladna da pokazuje čak i veća odstupanja od prosjeka cijeloga skupa, tj. ako je  $SS_{res} > SS_{tot}$ , moguće je čak da koeficijent determinacije bude i negativan.

Stoga je s ciljem utvrđivanja koeficijenta determinacije  $R^2$  ponovljen postupak određivanja *EEDI referentne krivulje* za ro-ro putničke brodove. Postupak je proveden korištenjem podataka dostupnih u okviru „IHS Fairplay“ baze podataka, točnije iz modula „World Register of Ships“ (WROS).

Prije provođenja samog postupka, potrebno je utvrditi točnost baze podataka, kao i točnost metodologije korištene za proračun *EEDI referentne krivulje*. To je napravljeno na način da je proračunata *EEDI referentna krivulja* za brodove za sipki teret. Naime, većina tih brodova ima konvencionalni BES te je statističko slaganje cijele flote brodova za sipki teret veoma dobro, Tablica 5.

Proračun *EEDI referentne krivulje* je proveden koristeći algoritam definiran u [32] prema prikazanom proračunskom dijagramu toka, Slika 24.



Slika 24 Proračunski algoritam za određivanje *EEDI referentne krivulje* za brodove za sipki teret prema [32]

Kako je i vidljivo iz algoritma, u proračunu su korišteni brodovi čiji je kapacitet  $GT \geq 400$ , a koji su isporučeni između 1. siječnja 1999. i 1. siječnja 2009. WROS baza podataka sadrži sveukupno 2716 brodova za sipki teret koji udovoljavaju navedenim kriterijima Budući da za neke brodove nedostaju podaci o ukupnoj snazi, brzini ili kapacitetu u DWT-ima, iz tog skupa je izuzet 61 brod, tako da je za proračun *EEDI referentne krivulje* korišteno 2655 brodova. Za svaki je brod određen *Procijenjeni EEDI* koristeći izraz:

$$\text{Procijenjeni EEDI} = \frac{3,1144 \left( 190 \cdot \sum_{i=1}^{nME} P_{MEi} + 215 \cdot P_{AE} \right)}{\text{Kapacitet} \cdot V_{ref}} \quad (23)$$

pri čemu je nosivost bila izražena u tonama DWT-a. Zatim je metodom najmanjih kvadrata određena vrijednosti parametara  $a$  i  $c$ , prema (6). Nakon provedenog proračuna, podaci su se filtrirali tako da su svi brodovi čiji je *Procijenjeni EEDI* odstupao za više od dvije standardne devijacije od *EEDI referentne krivulje* bili isključeni te proračun ponovio bez tih brodova. Rezultati proračuna su prikazani tablično, Tablica 36, i grafički, Slika 25 i Slika 26. Vidljivo je da se vrijednosti parametara ne poklapaju u potpunosti s parametrima koje je usvojio MEPC. Međutim, razlike su veoma male i nastale vjerojatno zbog razlike u ulaznim podacima, a ne razlike u metodologiji.

Naime, prema [32] za proračun *EEDI referentne krivulje* potrebno je promatrati samo brodove bruto tonaže 400 i iznad isporučene između 1. siječnja 1999. i 1. siječnja 2009. Međutim, nije jasno je li ovako definiran skup zatvoren ili otvoren, odnosno jesu li brodovi isporučeni upravo tog dana obuhvaćeni u analizi. Dodatan problem k tome predstavlja i to što baza podataka nema točan datum isporuke, već se svi brodovi isporučeni u tekućem mjesecu smatraju isporučenima prvoga u mjesecu. Stoga za 74 broda nije jasno jesu li bili obuhvaćeni analizom ili ne.

Također, metodologija predviđa da se svi brodovi čiji *Procijenjeni EEDI* odstupa za više od dvije standardne devijacije isključe iz analize, te se potom analiza ponavlja bez tih brodova kako bi se odredila „korigirana“ *EEDI referentna krivulja*. Međutim, budući da se u ovome slučaju radi o raspršenosti podataka oko krivulje (a ne točke) standardna devijacija nije jednoznačno definirana. Ako bi se primijenila definicija standardne devijacije kao kod raspršenosti oko točke („apsolutna“ standardna devijacija) prema (24), onda bi ona bila konstantna i iznosila 3,3559.

$$\sigma = \sqrt{\frac{(\text{Procijenjeni EEDI} - \text{referentni EEDI})^2}{N}} \quad (24)$$

To bi imalo za posljedicu da bi iz analize bili isključeni samo brodovi manje nosivosti. Naime, njihov je *Procijenjeni EEDI* u apsolutnom iznosu i za red veličine veći. Stoga, iako je njihovo relativno odstupanje od *EEDI referentne krivulje* manje u usporedbi s nekim brodovima veće nosivosti, apsolutno odstupanje je bitno veće. Takav način analize podataka ne bi trebao biti smatran niti ispravnim niti opravdanim. Kao alternativa nudi se definiranje standardne devijacije u relativnom odnosu („relativna“ standardna devijacija), prema (25).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\left(\frac{\text{Procijenjeni EEDI}}{\text{referentni EEDI}} - 1\right)^2}{N}} \quad (25)$$

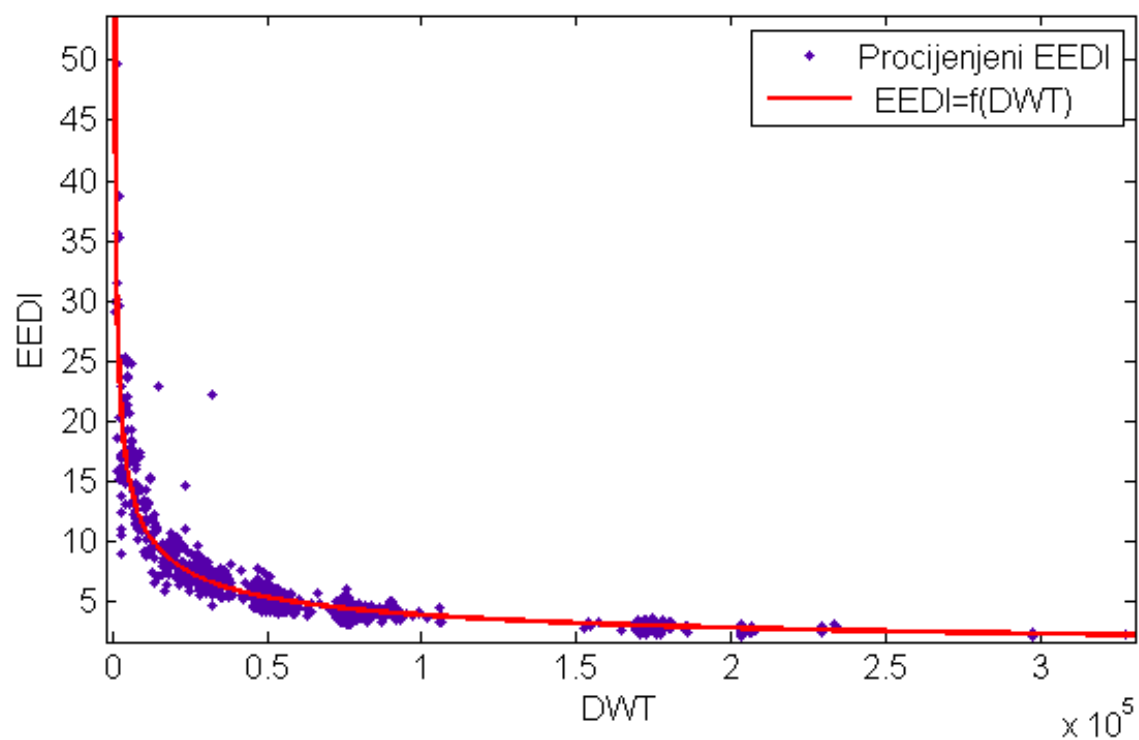
U tom bi slučaju standardna devijacija opet bila konstantna, međutim bila bi pokazatelj relativnog odstupanja podataka od referentne krivulje, u ovome slučaju 13,76%. U ovome bi slučaju iz analize bili izuzeti brodovi čiji *Procijenjeni EEDI* odstupa za više od dvije relativne standardne devijacije, odnosno 27,52%. Ovakav bi kriterij zasigurno imao više smisla.

Tablica 36 Rezultati proračuna *EEDI referentne krivulje* za brodove za sipki teret

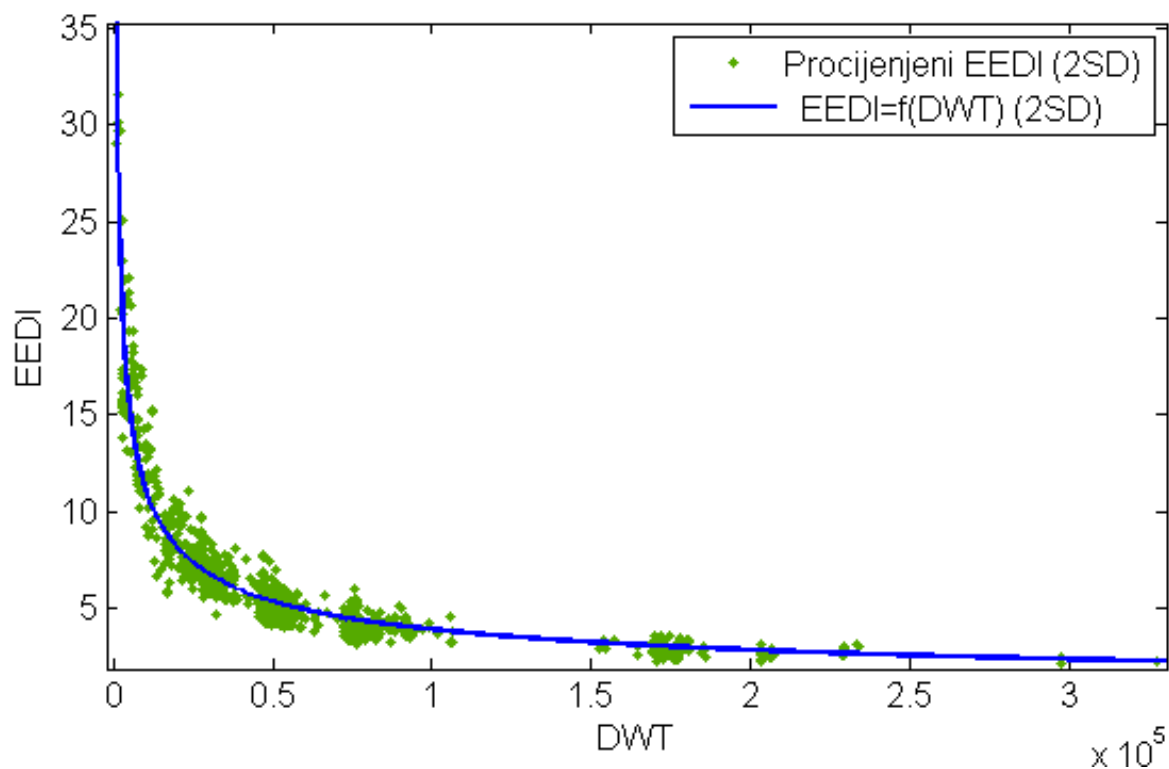
	Ponovljeni proračun	Ponovljeni proračun (izuzeti 2SD)	Usvojeno [30]
<i>a</i>	834,9	764,7	961,79
<i>c</i>	-0,4666	-0,4589	-0,477
$R^2$	0,8390	0,8972	0,9289
Brodova analizirano	2655	2634	2512
Brodova izuzeto	-	21	16

Niti jednom korekcijom ulaznih podataka nije bilo moguće dobiti u potpunosti jednake vrijednosti parametara *a* i *c* te koeficijenta determinacije  $R^2$ . Međutim, budući da odstupanje nije značajnog iznosa, smatra se da je metodologija korištena u ponovljenom proračunu ispravna.



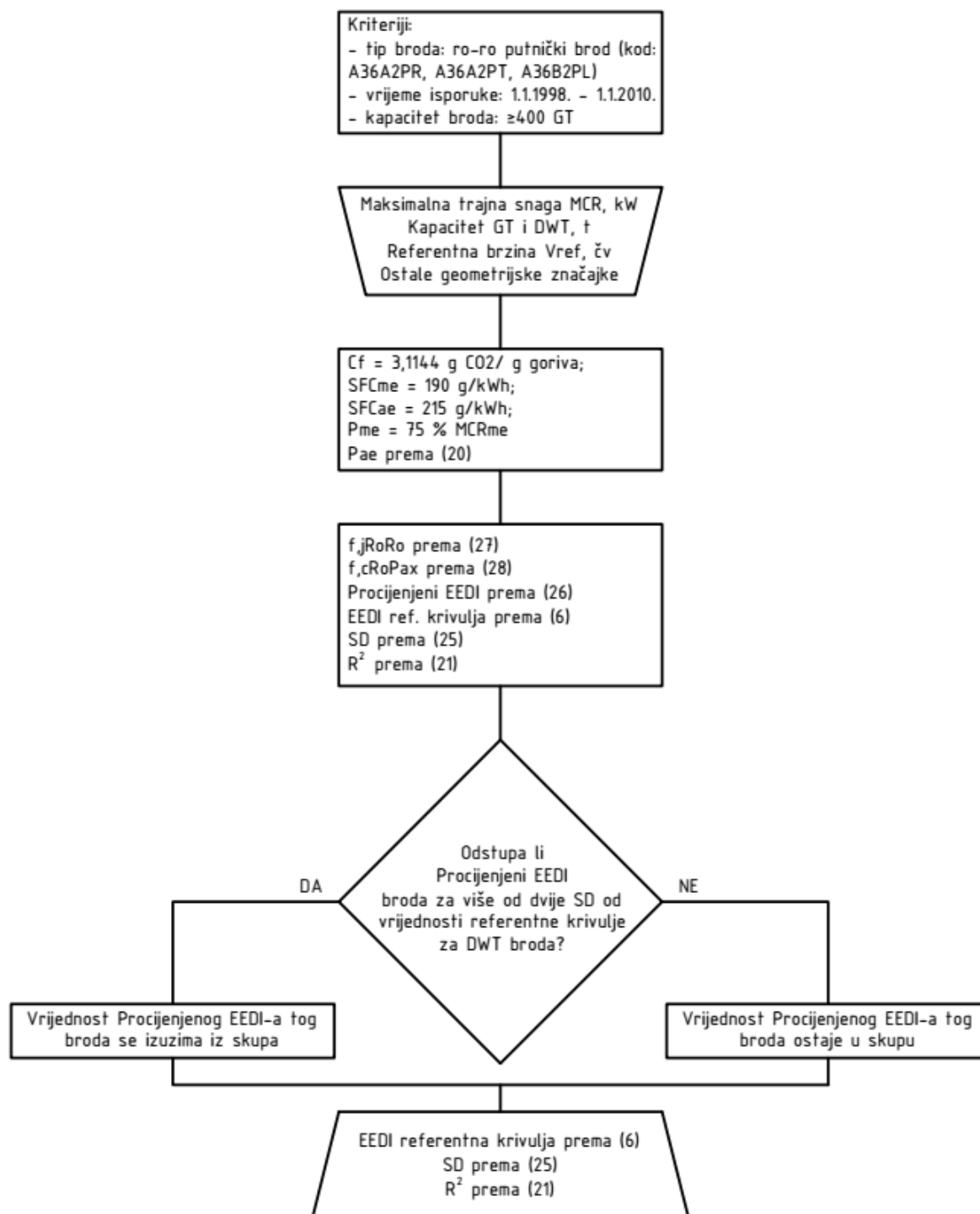


Slika 25 *EEDI referentna krivulja za brodove za sipki teret (prije odbacivanja brodova čiji Procijenjeni EEDI odstupa za više od dvije standardne devijacije)*



Slika 26 *EEDI referentna krivulja za brodove za sipki teret (prema uputama iz [32])*

Primjenom slične metodologije za određivanje *EEDI referentne krivulje* ro-ro putničkih brodova (prema [34]) dobivene su vrijednosti parametara *a* i *c* za taj tip brodova. Sam proračun je opet izvršen na temelju referentnih brodova iz WROS baze podataka prema proračunskom algoritmu, Slika 27.



Slika 27 Proračunski algoritam za određivanje *EEDI referentne krivulje* za ro-ro putničke brodove prema [34]

Baza podataka sadrži sveukupno 629 brodova koji udovoljavaju navedenim kriterijima. Nakon što se iz tog skupa izuzmu brodovi za koje nedostaje podatak o brzini ili snazi BES-a preostaje 525 brodova. Ako se iz toga skupa izuzmu brodovi za koje ne postoji podatak o kapacitetu, preostaju 492 broda. Formula za određivanje *Procijenjenog EEDI*-a za brodove iz WROS baze podataka glasi prema [34]:

$$Procijenjeni EEDI = \frac{3,1144 \left( f_{jRoRo} \cdot 190 \cdot \sum_{i=1}^{nME} P_{MEi} + 215 \cdot P_{AE} \right)}{f_{cRoPax} \cdot Kapacitet \cdot V_{ref}} \quad (26)$$

pri čemu je:

$$f_{jRoRo} = \frac{1}{Fr^\alpha \cdot \left( \frac{L_{pp}}{B_s} \right)^\beta \cdot \left( \frac{B_s}{d_s} \right)^\gamma \cdot \left( \frac{L_{pp}}{\nabla^{1/3}} \right)^\delta} \quad (27)$$

$Fr$  Froudeov broj prema (10),

$L_{pp}$  duljina broda između okomica (perpendikulara), m,

$B_s$  širina broda, m,

$d_s$  gaz broda, m,

$\nabla$  istisnina broda, m<sup>3</sup>,

a eksponenti su definirani prema tablici:

Tip broda	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$
ro-ro putnički	2,50	0,75	0,75	1,00

Ako je vrijednost  $f_{jRoRo} > 1$ , onda se uzima  $f_{jRoRo} = 1$ ,

$$f_{cRoPax} = \left( \frac{(DWT/GT)}{0.25} \right)^{-0.8} \quad (28)$$

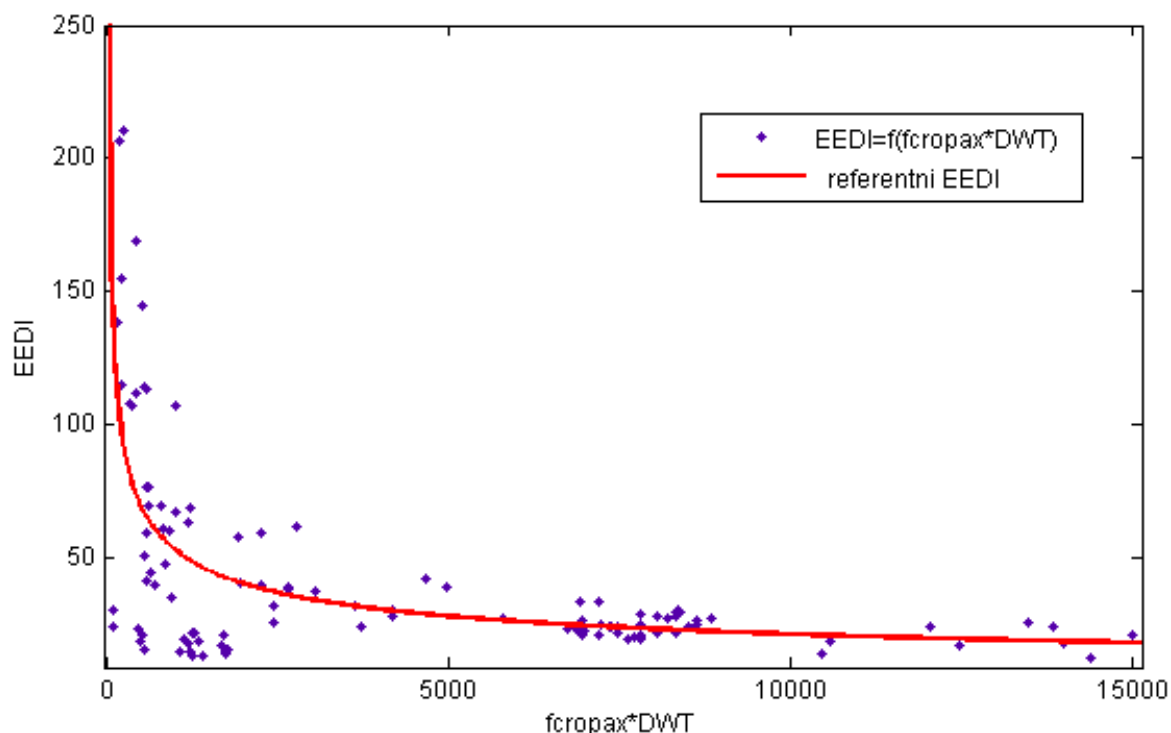
za brodove čiji je omjer DWT/GT manji od 0,25, inače  $f_{cRoPax} = 1$ .

Za izračun ova dva faktora potrebno je značajno više podataka od snage, brzine i kapaciteta. Stoga su brojni brodovi morali biti izuzeti iz analize zbog nedostatka nekog od navedenih podataka, pa je na kraju preostalo svega 111 brodova koji udovoljavaju svim navedenim kriterijima. *Procijenjeni EEDI* za te brodove je ranije prikazan grafički (Slika 28) i nakon (Slika 29) izuzimanja brodova čiji *Procijenjeni EEDI* odstupa za više od dvije standardne devijacije. Vrijednost parametara je prikazana tablično, Tablica 37.

Tablica 37 Rezultati proračuna *EEDI referentne krivulje* za ro-ro putničke brodove

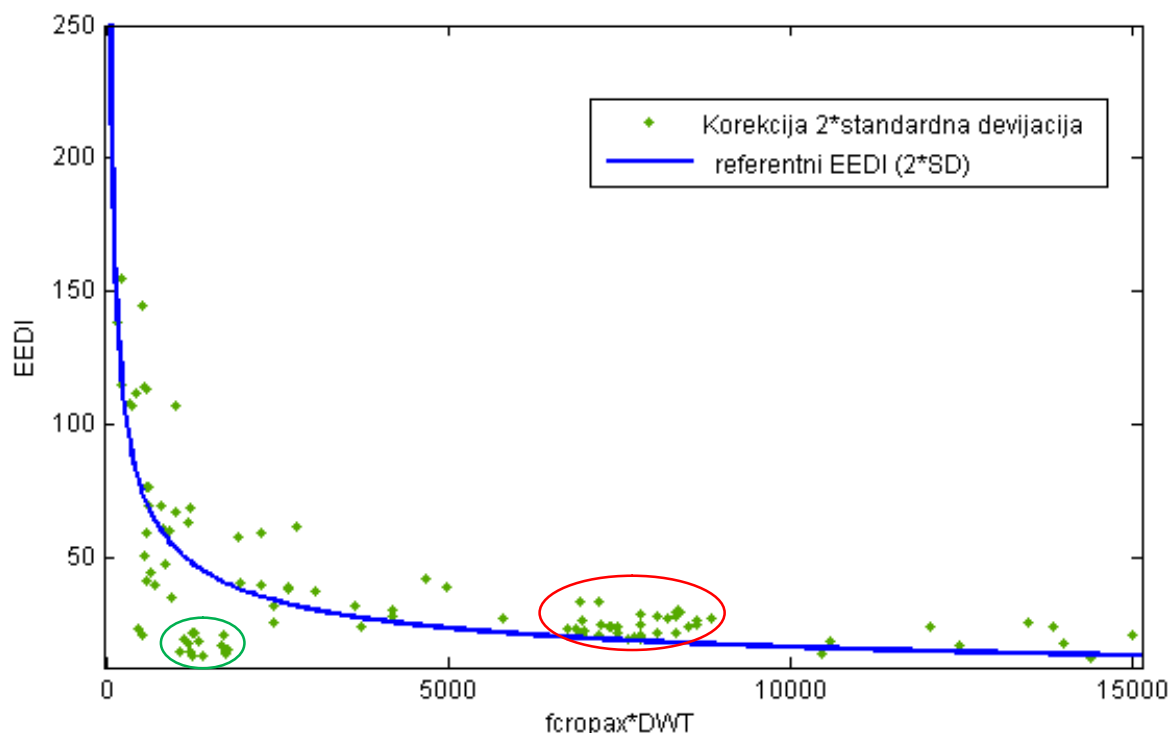
	Ponovljeni proračun	Ponovljeni proračun (2SD)	Usvojeno [35]
<i>a</i>	783	1830	752,16
<i>c</i>	-0,3894	-0,539	-0,381
$R^2$	0,3845	0,5811	*
brodova analizirano	111	102	*
odbačeno brodova	-	9	*

\*ne postoji javno dostupan podatak



Slika 28 *EEDI referentna krivulja za ro-ro putničke brodove (prije odbacivanja brodova čiji Procijenjeni EEDI odstupa za više od dvije standardne devijacije)*

Iz analize je vidljivo da se vrijednosti parametara dobro poklapaju s usvojenima prije izuzimanja brodova čiji *Procijenjeni EEDI* odstupa za više od dvije standardne devijacije od referentnog. Nakon izuzimanja, vrijednosti se ipak znatnije mijenjaju. Kao i kod brodova za sipki teret, i ovdje je teško sa sigurnošću utvrditi razlog odstupanjima, budući da su smjernice za proračun *EEDI referentne krivulje* i u ovom slučaju nejasne, a detaljni podaci o proračunu *EEDI referentne krivulje* nisu javno dostupni. Ipak iz ovog ponovljenog proračuna može se utvrditi da nije značajna statistička korelacija između ovako definirane *EEDI referentne krivulje* i kapaciteta postojeće flote brodova. Prije izuzimanja pojedinih brodova koeficijent determinacije iznosi svega  $R^2 = 0,38$ .



Slika 29 *EEDI referentna krivulja za ro-ro putničke brodove (prema uputama iz [34])*

Nakon izuzimanja brodova čiji *Procijenjeni EEDI* značajno odstupa (za više od dvije standardne devijacije), broj promatranih brodova od početnih 629 se smanjio na svega 102. Koeficijent determinacije je narastao, ali tek na  $R^2 = 0,58$ . Iz toga bi se moglo zaključiti da ovakav pristup pokazuje umjereno statističko slaganje podataka s referentnom krivuljom. Međutim, ovo vrijedi samo za ograničen broj ro-ro putničkih brodova. Nadalje, detaljnijom analizom mogu se uočiti dvije skupine brodova, Slika 29. Crveno označeno su brodovi između 7.000 i 9.000 t korigiranog DWT-a. Kao što je vidljivo, svi brodovi iz te skupine se nalaze iznad *EEDI referentne krivulje*. S druge strane, zeleno označeni brodovi (oko 1.500 t korigiranog DWT-a) se svi nalaze značajno ispod referentne krivulje. Iz toga se zaključuje da niti jedan brod nosivosti između 7.000 i 9.000 t korigiranog DWT-a ne zadovoljava *Zahtijevani EEDI* u 0. fazi (Tablica 6) te bi novi brodovi veoma teško mogli udovoljiti još strožim zahtjevima u kasnijim fazama. To je još jedan pokazatelj da se ovako definirana krivulja nikako ne može smatrati referentnom za ro-ro putničke brodove.

#### 4.4.2. Predloženi pristup definiranja EEDI referentne plohe

Budući da trenutni pristup ne rezultira zadovoljavajućom definicijom, cilj je predložiti alternativni pristup definiranja EEDI referentne krivulje, koji bi u konačnici bio i vjerniji prikaz energetske učinkovitosti postojeće flote brodova. Kako je već i utvrđeno u [43], kako bi se to postiglo, nužno je uvesti i brzinu broda kao parametar. U [43] je predloženo grupiranje brodova u ovisnosti o njihovim projektnim brzinama, a u sklopu ovoga doktorata prijedlog je *EEDI referentnu krivulju* proširiti u *EEDI referentnu plohu* gdje bi:

$$EEDI \text{ referentna ploha} = f(Kapacitet, v) \quad (29)$$

Budući da je mnogo prikladnije kapacitet ro-ro putničkih brodova izražavati u bruto tonaži – GT (kako je i prethodno opisano), taj će pristup biti korišten i u ovome doktoratu. Stoga je pretpostavljeno:

$$EEDI \text{ referentna ploha} = f(GT, v) \quad (30)$$

Kako bi se mogao utvrditi oblik funkcije koji najbolje opisuje navedenu ovisnost, potrebno je provesti bezdimenzijsku analizu. To će biti provedeno analiziranjem sljedećih ovisnosti:

$$EEDI \approx \frac{P}{GT \cdot v} \quad (31)$$

$$P \approx v^3 \cdot S \quad (32)$$

$$GT \approx S^{3/2} \approx L_{wl}^3 \quad (33)$$

gdje su:

$S$  oplakana površina broda,  $m^2$ ,

$L_{wl}$  duljina broda na vodnoj liniji, m.

U izrazu (31) pretpostavljena je približno konstantna specifična potrošnja goriva  $SFC$  i koeficijent pretvorbe goriva u  $CO_2$   $C_F$ . U izrazu (32) promatrana je samo snaga porivnog sustava, dok je snaga za ostale sustave zanemarena.

Iz navedenih relacija slijedi da je za sličan brod nepromijenjene brzine te dvostruko većeg kapaciteta izraženog u GT-u:

$$\begin{aligned} GT_2 = 2GT_1 \\ v_2 = v_1 \end{aligned} \quad \rightarrow \quad \begin{aligned} S_2 &= (GT_2 / GT_1)^{2/3} S_1 = 2^{2/3} S_1 \\ P_2 &= (S_2 v_2^3 / S_1 v_1^3) P_1 = 2^{2/3} P_1 \\ EEDI_2 &= \frac{P_2}{v \cdot GT_2} = \frac{2^{2/3} P_1}{v \cdot 2GT_1} = 2^{-1/3} EEDI_1 \end{aligned}$$

iz čega je vidljivo da je ovisnosti EEDI-a o kapacitetu broda izraženom u GT-u za konstantnu brzinu:

$$EEDI \text{ referentna ploha} = GT^{-1/3} f(v) \quad (34)$$

Ako bi se umjesto kapaciteta mijenjala brzina, slijedilo bi:

$$\begin{aligned} GT_2 = GT_1 \\ v_2 = 2v_1 \end{aligned} \quad \rightarrow \quad \begin{aligned} S_2 &= S_1 \\ P_2 &= (S_2 v_2^3 / S_1 v_1^3) P_1 = 8P_1 \\ EEDI_2 &= \frac{P_2}{v \cdot GT_2} = \frac{8P_1}{2v \cdot GT_1} = 4EEDI_1 \end{aligned}$$

Iz ovoga je vidljivo da vrijedi, pri konstantnom kapacitetu, kvadratna ovisnost EEDI-a o brzini. Iz ove analize se može zaključiti da bi u teoriji trebala vrijediti sljedeća relacija:

$$EEDI \text{ referentna ploha} \approx GT^{-1/3} \cdot v^2 \quad (35)$$

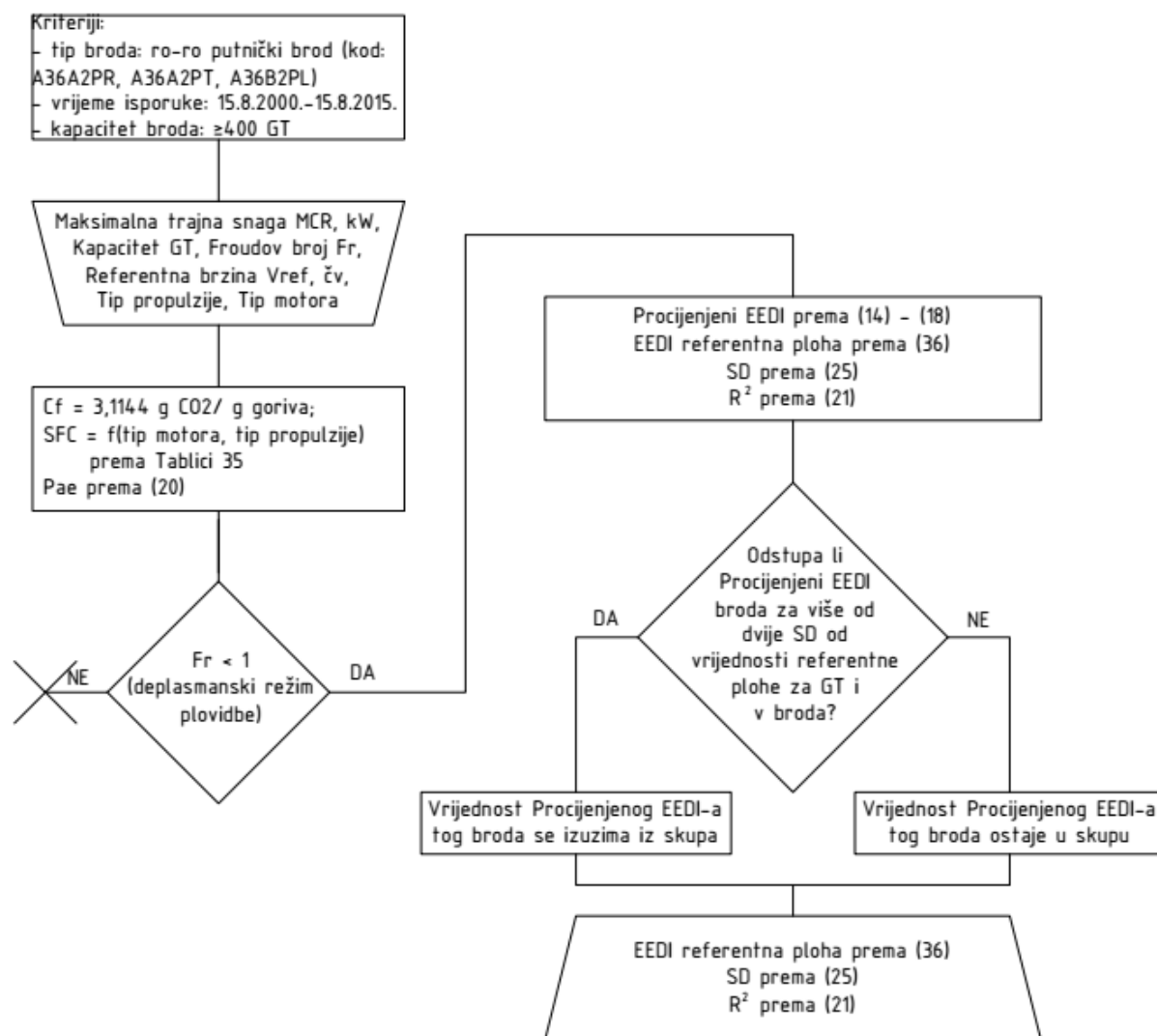
Budući da postojeća flota brodova zasigurno neće u potpunosti slijediti ovakvu ovisnost, pretpostavljena je sljedeća ovisnost:

$$EEDI \text{ referentna ploha} = a \cdot GT^b \cdot v^c \quad (36)$$

pri čemu se kao cilj analize postavlja odrediti parametre  $a$ ,  $b$  i  $c$ , te također koeficijent determinacije  $R^2$  kako bi se dobiveni parametri mogli kritički sagledati.

Sama metodologija proračuna *EEDI referentne plohe* nije bitno različita od metodologije korištene za proračun *EEDI referentne krivulje*, ali ipak napravljene su određene modifikacije kako bi proračunata *EEDI referentna ploha* bila što vjerniji prikaz flote, Slika 30.



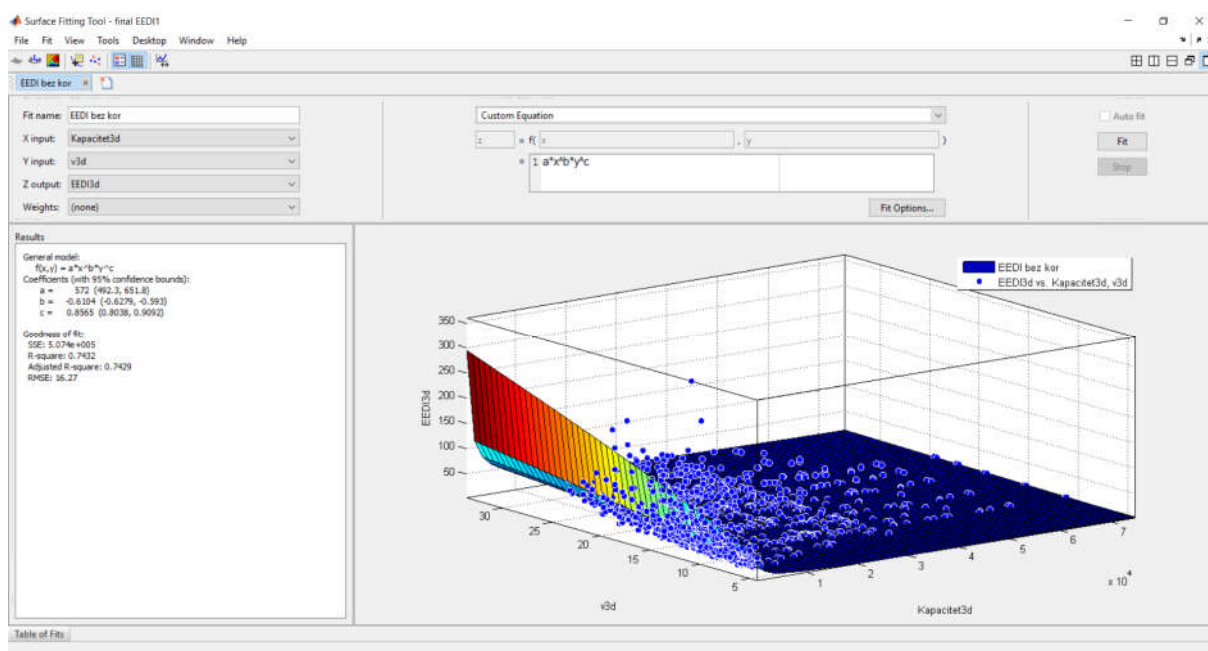


Slika 30 Proračunski algoritam za *EEDI referentnu plohu* za ro-ro putničke brodove

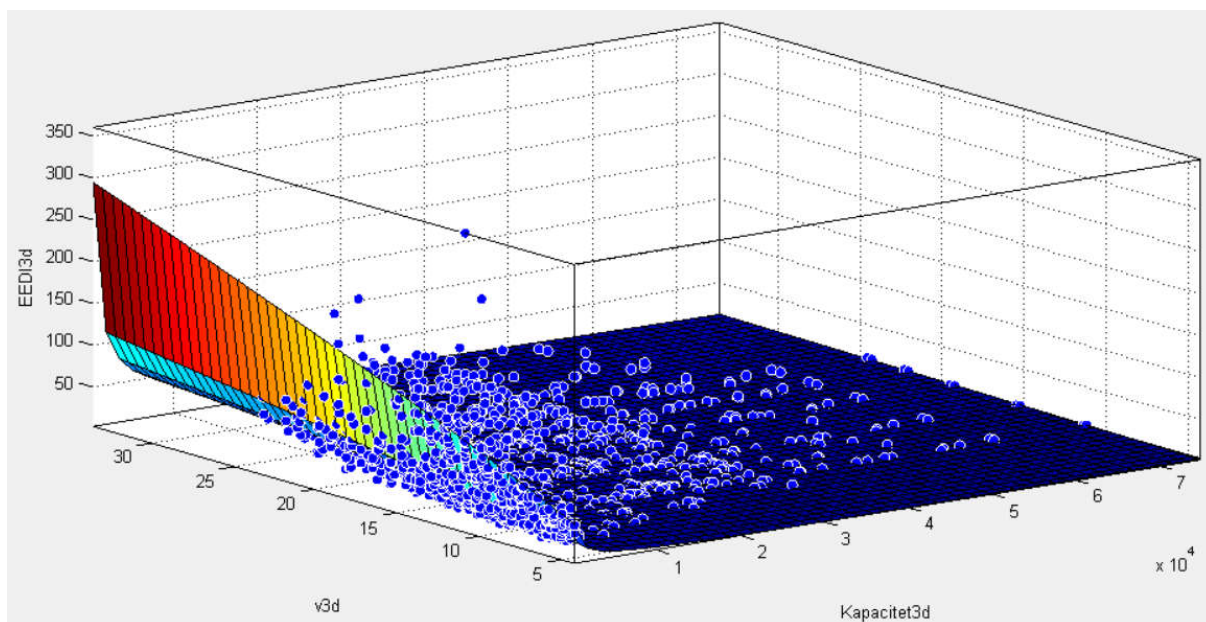
Prije svega, *Procijenjeni EEDI* nije računat u samo jednoj, već u pet referentnih točaka kako je i predloženo prema metodologiji proračuna *Postignutog EEDI-a*. Za konvencionalne BES-e referentne su točke definirane kao u NO<sub>x</sub> tehničkom zapisniku za cikluse E2 (u slučaju CPP-a) i E3 (u slučaju FPP-a), dok je u svim referentnim točkama pretpostavljena konstantna emisija CO<sub>2</sub> pomoćnog postrojenja. Za dizel-električne BES-e pretpostavljeno je da motori rade u najpovoljnijem režimu, osim pri maksimalnom opterećenju porivnog sustava kada su i svi motori opterećeni 100%, te pri minimalnom opterećenju, Tablica 35. Emisija pomoćnog postrojenja ne postoji jer ne postoji niti samo pomoćno postrojenje.

Podaci o snazi potrebnoj za pogon pomoćnog postrojenja su određeni prema formuli (20) kao funkcija od GT. Ovakav način određivanja snage nije ni egzaktni ni fizikalan, ali je pokazao zadovoljavajuće slaganje, a odabran je zato jer podaci o snazi pomoćnih motora nisu tablično dostupni u WROS bazi podataka. Iako ovakav pristup daje rezultate koji su blizu realnim stanjima plovidbe, za proračun *Postignutog EEDI*-a za nove brodove ipak je precizniji način predložen u prethodnom poglavlju.

Ovakva metodologija je primijenjena na deplasmentske ro-ro putničke brodove isporučene između 15. kolovoza 2000. i 15. kolovoza 2015, njih ukupno 384, Tablica 14. Za određivanje parametara referentne plohe je korišten „MATLAB – Surface Fitting Toolbox“, Slika 31. Rezultat proračuna *EEDI referentne plohe* je dao sljedeće vrijednosti parametara, Slika 32.

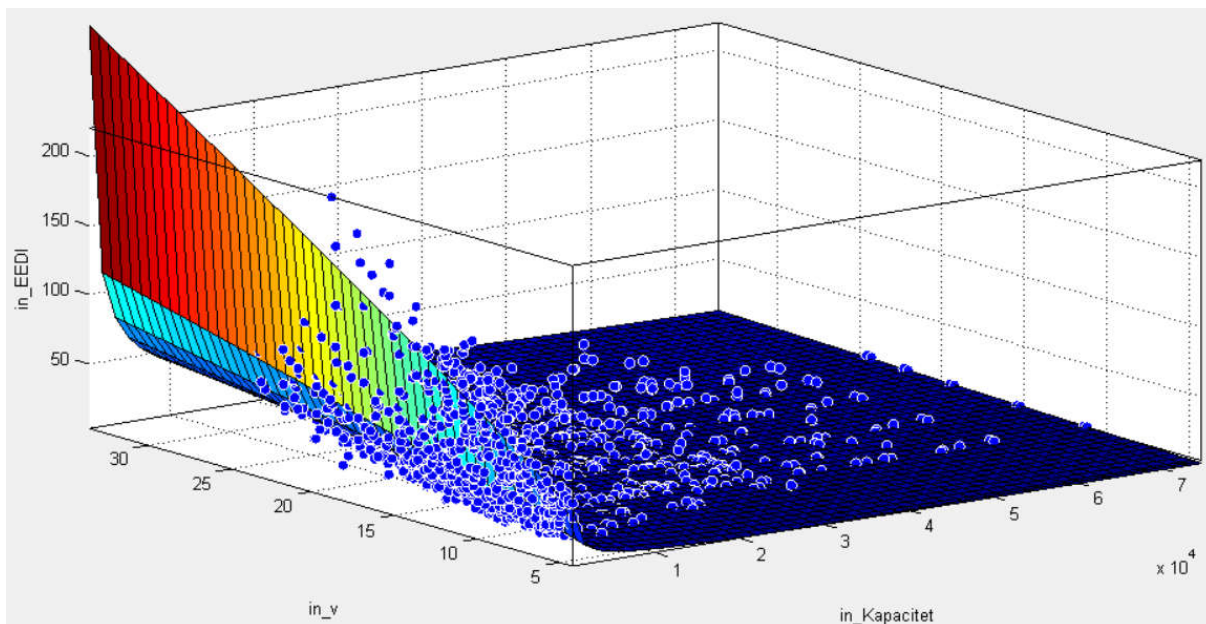


Slika 31 Grafičko sučelje „MATLAB – Surface Fitting Toolbox“



Slika 32 EEDI referentna ploha prije korekcije  
 $(a = 572, b = -0,6104, c = 0,8565, R^2 = 0,7432)$

Nakon izuzimanja podataka za *Procijenjeni EEDI* koji odstupaju za više od dvije relativne standardne devijacije, vrijednosti parametara se nešto mijenjaju, Slika 33.



Slika 33 EEDI referentna ploha nakon korekcije  
 $(a = 431, b = -0,602, c = 0,9217, R^2 = 0,8569)$

Iz grafičkog prikaza *EEDI referentne plohe*, kao i iz vrijednosti koeficijenta determinacije vidljivo je da predložena *EEDI referentna ploha* veoma dobro opisuje postojeću flotu

brodova, čak i prije korekcije, tj. izuzimanja brodova čija vrijednost *Procijenjenog EEDI*-a odstupa za više od dvije standardne devijacije. Nakon korekcije, vidljivo je da je vrijednost koeficijenta determinacije narasla iznad 0,75 što upućuje na veoma dobru povezanost *EEDI referentne plohe* i *Procijenjenih EEDI*-eva trenutne flote ro-ro putničkih brodova. Vrijednosti parametara *b* i *c* su blizu vrijednosti dobivenih dimenzijskom analizom, iako uz određeno odstupanje. Vrijednost parametra *b* jest negativna, što znači da povećanjem kapaciteta pada EEDI. Ipak, budući da kao kapacitet nije korišten samo GT, već je korišten ponderirani zbroj GT-a i DWT-a, vrijednost odstupa od očekivane.

S druge strane, vrijednost parametra *c* jest pozitivna, što znači da povećanjem brzine raste i vrijednost EEDI-a, međutim ne koliko je i očekivano. Djelomično objašnjenje toga je da se brojnik i *Procijenjenom EEDI*-u ne sastoji samo od snage potrebne za propulziju broda, već i od snage potrebne za pomoćno postrojenje koja pak nije ovisna o brzini. Drugi razlog, a koji nije bio očekivan u preliminarnoj fazi istraživanja, jest da je otpor bržih brodova bitno manji nego bi se to moglo zaključiti iz bezdimenzijske analize. Uzrok manjega otpora je nedvojbeno veći trud uložen u optimiranje porivnog sustava, od same forme broda, propulzora, prijenosa snage do prvopokretača. To daje za pravo očekivati da i sporiji brodovi mogu dodatno smanjiti svoj otpor te time jasno smanjiti i potrebnu snagu prvopokretača kao i vrijednost EEDI-a, a time i povećati energetske učinkovitost i ekološku prihvatljivost broda.

Alternativno, kapacitet bi se mogao izraziti ponderiranjem GT-a i DWT-a. Budući da prosječni omjer DWT-a i GT-a za ro-ro putničke brodove promatrane u ovoj analizi, Tablica 14, iznosi 0,28, kapacitet bi mogao biti definiran prema:

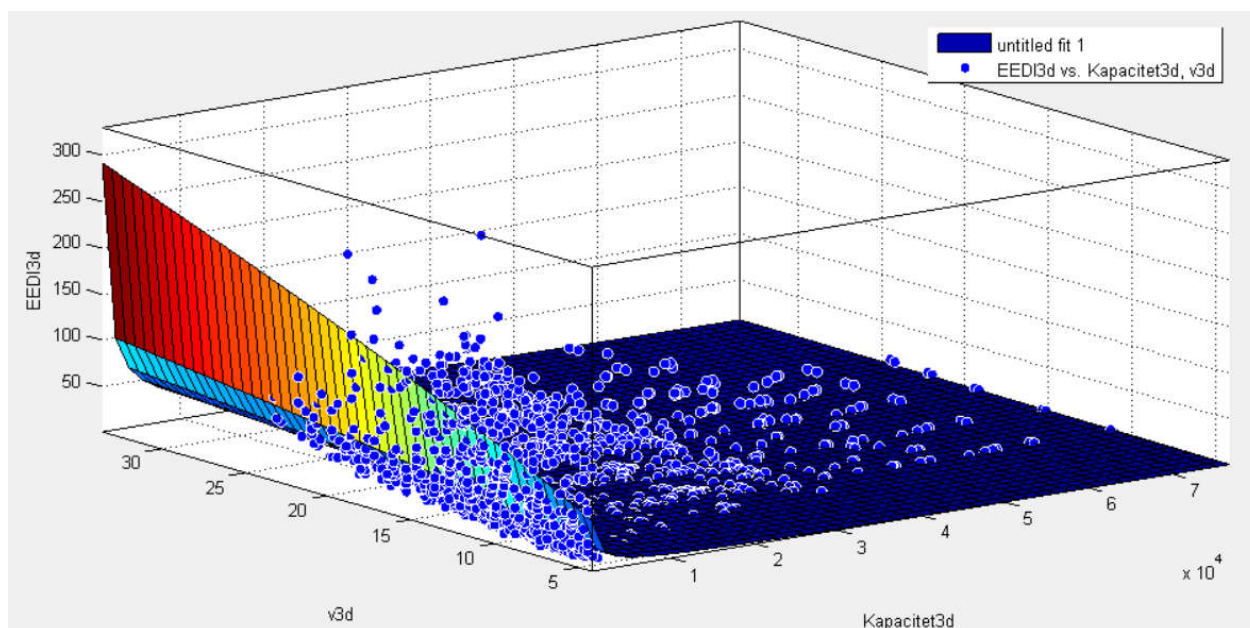
$$\text{Kapacitet} = 0,28 \cdot GT + DWT \quad (37)$$

U tom bi slučaju vrijednosti parametara EEDI referentne plohe bile nešto drugačije, Slika 34, odnosno nakon izuzimanja podataka za *Procijenjeni EEDI* koji odstupaju za više od dvije relativne standardne devijacije, Slika 35.

Opravdanost ovakvog pristupa potvrđuje sljedeći primjer: od dva slična broda jedan prevozi osobne automobile i putnike, a drugi kamione s prikolicom. Oba imaju jednaku zapreminu, tj. jednak GT, međutim brod koji krca putnike i osobne automobile ima manji DWT, a time i manji gaz što mu omogućuje da uz jednaku snagu poriva postigne veću brzinu. Uvođenjem DWT-a pri određivanju Kapaciteta moglo bi se spriječiti penaliziranje brodova namijenjenih za prijevoz težih tereta. Međutim, kao što je već objašnjeno, DWT za ro-ro putničke brodove

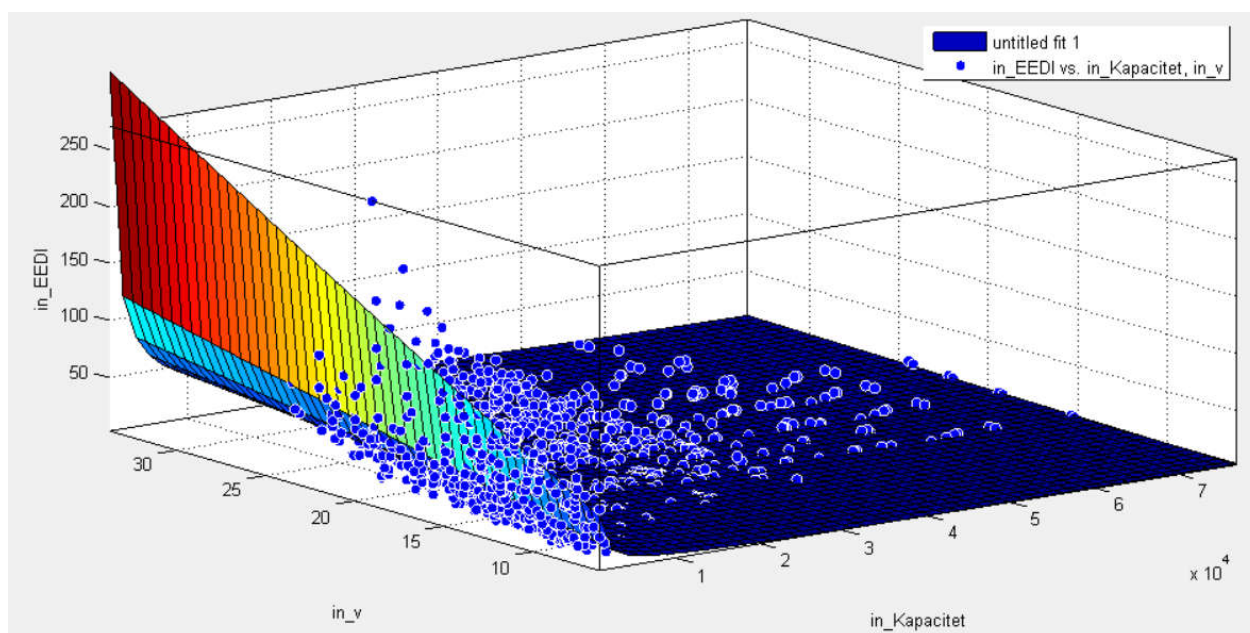


nije primjerena veličina jer najčešće kapacitet nije ograničen masom tereta, već volumenom. To pokazuje i ova analiza jer je *koeficijent determinacije EEDI* referentne plohe u ovom slučaju nešto i manji nego u slučaju kada je kapacitet definiran kao GT.



Slika 34 EEDI referentna ploha prije korekcije (kapacitet  $f(GT, DWT)$ )

$$(a = 478,9, b = -0,5635, c = 0,88, R^2 = 0,6957)$$



Slika 35 EEDI referentna ploha nakon korekcije

$$(a = 333,2, b = -0,5463, c = 0,9475, R^2 = 0,8154)$$

#### 4.4.3. Trenutni pristup definiranju faktora smanjenja $X$

U fazi 0, od 1. 1. 2013. do 31. 12. 2014, *Zahtijevani EEDI* je jednak vrijednosti *EEDI referentne krivulje*. Faktor smanjenja  $X$ , kako se i iz samog naziva može zaključiti, smanjuje vrijednost *Zahtijevanog EEDI*-a prema formuli (5) u vremenskim intervalima (Tablica 6). Cilj povećanja faktora smanjenja  $X$  je smanjiti vrijednost *Zahtijevanog EEDI*-a, a time i povećati energetske učinkovitost novih brodova (npr. primjenom inovativnih energetski učinkovitih tehnologija). Međutim, trenutni način definiranja faktora smanjenja ne jamči ostvarenje navedenog cilja. Dapače, trenutni način predstavlja svojevrsnu labilnu ravnotežu sustava *Zahtijevani EEDI* – brod. Naime, u budućnosti se može pojaviti jedna od dolje navedenih situacija:

1. ovako definiran faktor smanjenja postavlja preblage zahtjeve kojima već i postojeći brodovi mogu udovoljiti bez značajnih ulaganja,
2. ovako definiran faktor smanjenja postavlja prestroge zahtjeve kojima novi brodovi niti uz značajnija ulaganja i smanjenja projektne brzine neće moći udovoljiti.

U prvom scenariju bit će postignuto određeno povećanje energetske učinkovitosti, no niti blizu do razina koje bi bile moguće da je faktor smanjenja postavljen strože. Drugi scenarij može dovesti do značajnih smanjenja projektne brzine broda, kao i instalirane snage BES-a što za posljedicu može imati smanjenje sigurnosti plovidbe osobito u uvjetima teškoga mora. Niti prvi niti drugi scenarij nisu poželjni, već je cilj upravo postaviti takve zahtjeve koji će potaknuti povećanje energetske učinkovitosti broda, a neće ugroziti sigurnost plovidbe. Određivanje ovakvog zahtjeva iziskuje provođenje detaljne analize koja bi obuhvatila mnogobrojne parametre koje utječu na BES.

#### 4.4.4. Predloženi pristup definiranja faktora smanjenja $X$

Opširan kritički osvrt na ovu problematiku je dan u [13]. Kao jedan od kriterija za ocjenu prihvatljivosti trenutnog načina povećanja faktora smanjenja odabran je kriterij postizanja srednje vrijednosti koncentracije  $\text{CO}_2$  u atmosferi. Naime, rastom gospodarstva od industrijske revolucije do danas je uvelike povećana srednja vrijednost koncentracije  $\text{CO}_2$  u atmosferi. Ta pojava uvjetuje proces globalnog zatopljenja. Kako bi se taj proces zaustavio potrebno je stabilizirati srednju vrijednost koncentracije  $\text{CO}_2$  u atmosferi. Razne studije su proučavale taj problem [11], a kao rezultat su predložene različite stope smanjenja emisije  $\text{CO}_2$  na godišnjoj razini kako bi se postigle određene srednje vrijednosti koncentracije  $\text{CO}_2$  u atmosferi.

Kao zaključak u [13] navodi se da trenutni pristup povećanja faktora smanjenja  $X$  vjerojatno neće imati željene rezultate povećanja energetske učinkovitosti. Naime, predviđena emisija  $\text{CO}_2$  brodova za sipki teret je viša od one potrebne za stabilizaciju srednje vrijednosti koncentracije  $\text{CO}_2$  u atmosferi. Stoga se kao alternativa uvodi izmijenjeni zahtjev za nove brodove: „Brod ne smije imati nižu energetske učinkovitost od prosjeka za taj tip i tu veličinu broda u vrijeme potpisivanja ugovora o gradnji.“ Ovakav „dinamički“ zahtjev pretpostavlja kontinuirano računanje *EEDI referentne krivulje* (ili u kraćim intervalima, primjerice godinu dana). Ovakav pristup omogućava svojevrsnu tržišnu samokontrolu. Ako su za određeni tip brodova moguća značajnija poboljšanja energetske učinkovitosti, implementacijom tih rješenja na pojedine brodove će se smanjiti vrijednost *EEDI referentne krivulje*. Smanjenje te vrijednosti će onda prisiliti i druge nove brodove na primjenu tih ili sličnih rješenja, što će onda dalje smanjivati vrijednost *EEDI referentne krivulje*. Ako pak značajnija smanjenja nisu moguća, novi brodovi će se graditi tako da im je *Postignuti EEDI* blizu referentnom, što će za posljedicu imati da će *EEDI referentna krivulja* ostati relativno nepromijenjena. Dakako, ovakav pristup bi zahtijevao i povećan napor od strane MEPC-a i drugih organizacija (posebice registara brodova), no konačni cilj povećanja energetske učinkovitosti cijele flote novih brodova, kao i smanjenje emisija stakleničkih plinova bi ipak trebao biti dovoljan razlog za taj povećani angažman.

## 5. INDEKS ENERGETSKE UČINKOVITOSTI I EKOLOŠKE PRIHVATLJIVOSTI

Slijedeći metodologiju određivanja integralnog utjecaja na okoliš, opisanu u poglavlju 3.2 i predloženi pristup određivanja energetske učinkovitosti brodova moguće je definirati Indeks energetske učinkovitosti i ekološke prihvatljivosti (eng. *Index of Energy Efficiency and Environmental Eligibility – I4E*). *I4E* će biti definiran na temelju različitih kategorija utjecaja na okoliš, tj. u ovisnosti o vrijednosti potencijala globalnog zagrijavanja (*GWP*), acidifikacije (*AP*) i eutrofikacije (*EP*). Uz korištenje utjecajnih faktora za različite kategorije utjecaja na okoliš, Tablica 3, moguće je definirati *Indeks energetske učinkovitosti i ekološke prihvatljivosti – I4E*. Radi preglednosti, svi utjecajni faktori, Tablica 3, bit će pomnoženi s 1000, tako da ukupan izraz za *I4E* izgleda:

$$I4E = 0,095 \cdot GWP + 18,3 \cdot AP + 21,1 \cdot EP \quad (38)$$

Pri tome će najprije biti potrebno definirati vrijednosti različitih kategorija utjecaja na okoliš, ovisno o emisijama štetnih spojeva korištenjem faktora normalizacije, Tablica 2:

$$GWP = 1 \cdot EEDI \quad (39)$$

$$AP = 1 \cdot SO_x \text{ Indeks} + 0,7 \cdot NO_x \text{ Indeks} \quad (40)$$

$$EP = 1,35 \cdot NO_x \text{ Indeks} \quad (41)$$

Navedeni potencijali su određeni na temelju referentnih ploha *EEDI*-a, *NO<sub>x</sub> Indeksa* i *SO<sub>x</sub> Indeksa* za pojedine tipove brodova. Budući da je *EEDI referentna ploha* za ro-ro putničke brodova već definirana u prethodnom poglavlju, ostaje potrebno analizirati emisiju *NO<sub>x</sub>* i *SO<sub>x</sub>* spojeva ro-ro putničkih brodova.



### 5.1. Analiza emisije NO<sub>x</sub> spojeva

Trenutni pristup ograničenja emisija NO<sub>x</sub> spojeva s brodova definira dozvoljenu specifičnu emisiju dizelskih motora u g NO<sub>x</sub>/kWh, Slika 8. Pri tome je emisija NO<sub>x</sub> spojeva definirana kao zbroj emisija NO i NO<sub>2</sub> [22]. Ovakav pristup je do sada pokazao pozitivne rezultate. Naime, relativna emisija NO<sub>x</sub> spojeva s brodova (po toni goriva) se smanjila, no zbog velikog porasta brodskog prometa, ukupna emisija NO<sub>x</sub> spojeva se ipak povećala [4]. Uvođenje Tier III zahtjeva, Slika 9, znatno smanjuje dozvoljene emisije unutar zona kontrolirane emisije. Međutim, upitno je kakav će to utjecaj imati na globalnu emisiju budući da dizelski motori vjerojatno neće moći udovoljiti tim zahtjevima bez korištenja sekundarnih metoda, tj. bez kemijske obrade ispušnih plinova.

U okviru ovoga istraživanja predlože se drugačije normiranje dozvoljenih emisija NO<sub>x</sub> spojeva. Umjesto ograničavanja specifične emisije NO<sub>x</sub> spojeva motora, predlaže se uvođenje *NO<sub>x</sub> Indeksa*, na analogni način kao EEDI. *NO<sub>x</sub> Indeks* bi predstavljao emisiju NO<sub>x</sub> spojeva s broda u ovisnosti o gospodarskom učinku broda. Kao kod EEDI-a, i ovdje bi bio definiran *Postignuti NO<sub>x</sub> Indeks*, *Procijenjeni NO<sub>x</sub> Indeks* kao i *Zahtijevani NO<sub>x</sub> Indeks*. Na sličan način je *Zahtijevani NO<sub>x</sub> Indeks* definiran pomoću *NO<sub>x</sub> referentne plohe* te odgovarajućeg *faktora smanjenja X*.

$$\text{Postignuti } NO_x \text{ Indeks} \leq \text{Zahtijevani } NO_x \text{ Indeks} \quad (42)$$

$$\text{Zahtijevani } NO_x \text{ Indeks} = (1 - X / 100) \times \text{Vrijednost } NO_x \text{ referentne plohe} \quad (43)$$

Vrijednost *Postignutog NO<sub>x</sub> Indeksa* je definirana omjerom ukupne emisije NO<sub>x</sub> spojeva svih prvopokretača pri različitim opterećenjima:

$$\text{Postignuti } NO_x \text{ Indeks}_{100} = \frac{\sum \text{Emisija } NO_{x,100}}{\text{Kapacitet} \cdot V_{100}} \quad (44)$$

$$\text{Postignuti } NO_x \text{ Indeks}_{75} = \frac{\sum \text{Emisija } NO_{x,75}}{\text{Kapacitet} \cdot V_{75}} \quad (45)$$

$$\text{Postignuti } NO_x \text{ Indeks}_{50} = \frac{\sum \text{Emisija } NO_{x,50}}{\text{Kapacitet} \cdot V_{50}} \quad (46)$$

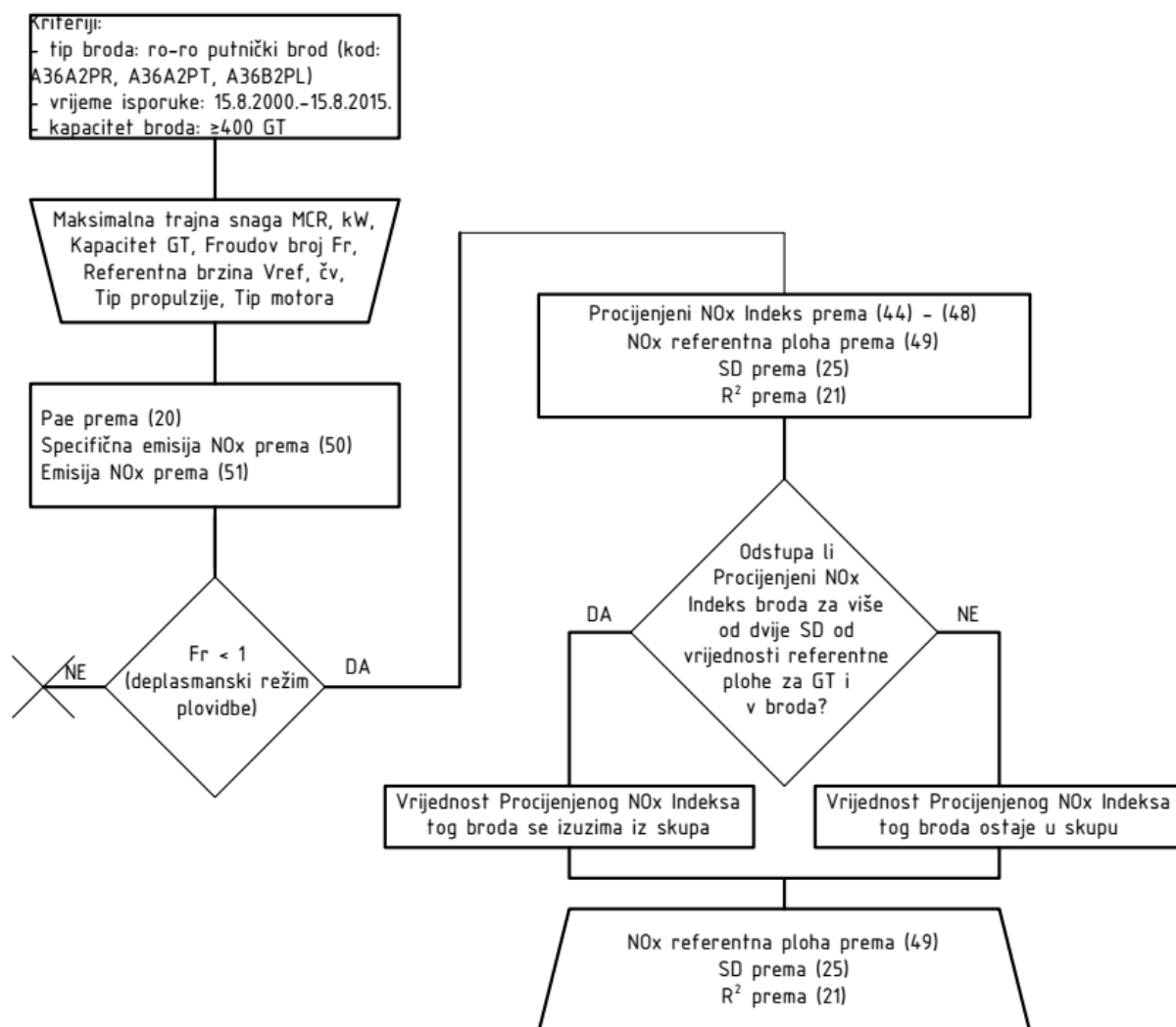
$$Postignuti NO_x Indeks_{25} = \frac{\sum Emisija NO_{x,25}}{Kapacitet \cdot V_{25}} \quad (47)$$

$$Postignuti NO_x Indeks_{10} = \frac{\sum Emisija NO_{x,10}}{Kapacitet \cdot V_{10}} \quad (48)$$

Vrijednost  $NO_x$  referentne plohe se može također na sličan način definirati u ovisnosti o brzini i kapacitetu broda:

$$Vrijednost NO_x referentne plohe = a \cdot Kapacitet^{-b} \cdot V^{-c} \quad (49)$$

Parametre  $a$ ,  $b$  i  $c$  moguće je odrediti također korištenjem WROS baze podataka i metodologije analogne kao kod određivanje  $EEDI$  referentne plohe, Slika 36.



Slika 36 Proračunski algoritam za određivanje  $NO_x$  referentne plohe

Činjenicu da trenutna flota brodova mora udovoljavati Tier II (u nekim slučajevima Tier I) zahtjevima, moguće je korisno upotrijebiti. Naime, trenutna regulativa normira dozvoljenu specifičnu emisiju  $NO_x$  spojeva u ovisnosti o brzini vrtnje motora. Budući da WROS sadrži podatke o snazi i brzini vrtnje motora, moguće je odrediti emisiju  $NO_x$  spojeva, kao i vrijednost *Procijenjenog  $NO_x$  Indeksa* iz sljedećeg skupa jednažbi:

$$Spec. emisija NO_x = \begin{cases} 14,4 & \text{za } n < 130 \text{ o/min} \\ 44 \cdot n^{-0,23} & \text{za } n \in \langle 130, 2000 \rangle \\ 7,7 & \text{za } n > 2000 \text{ o/min} \end{cases} \quad (50)$$

$$Emisija NO_x = Spec. Emisija NO_x \cdot P \quad (51)$$

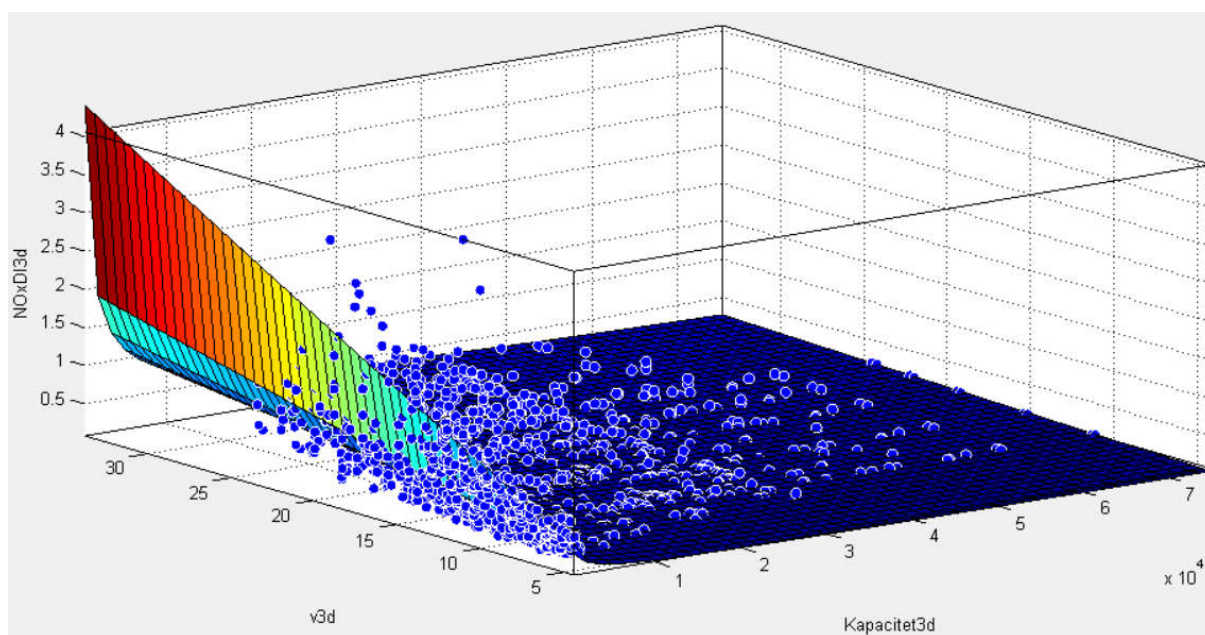
$$Procijenjeni NO_x Indeks = \frac{\sum Emisija NO_x}{Kapacitet \cdot V} \quad (52)$$

pri čemu su:

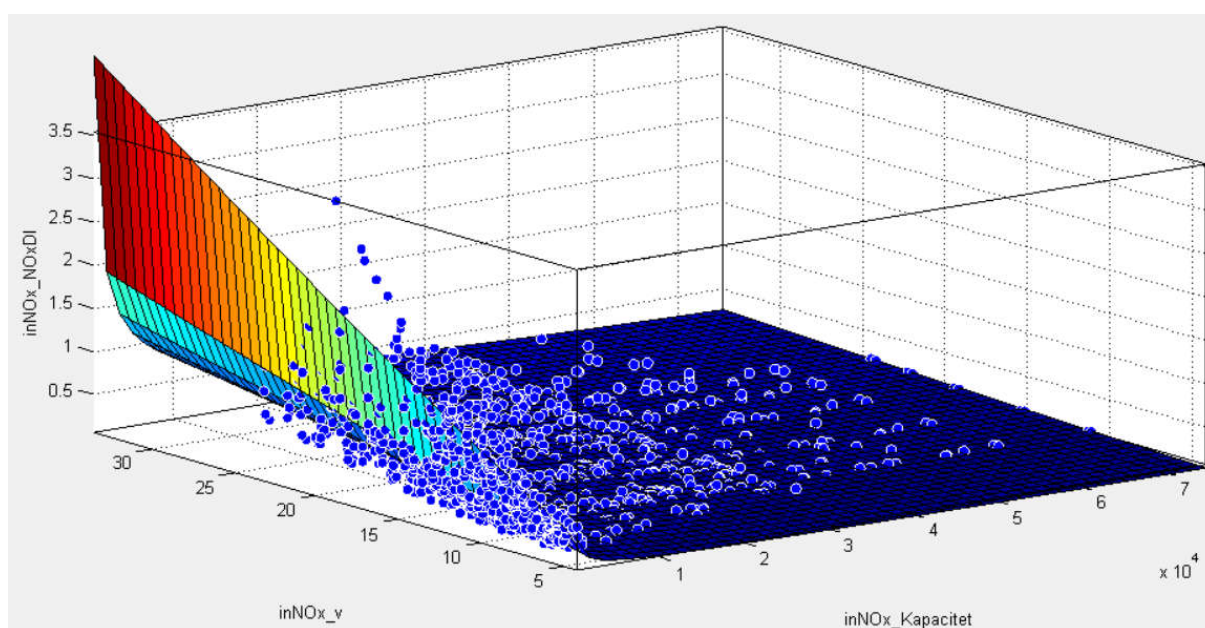
$n$  brzina vrtnje motora, o/min,

$P$  snaga motora, kW.

Kao i emisija  $CO_2$ , i emisija  $NO_x$  spojeva se može odrediti i izravno iz EIAPP svjedodžbe. Primjenom ovakvog pristupa određena je  *$NO_x$  referentna ploha* za ro-ro putničke brodove, Slika 37 i Slika 38, uz korištenje brodova iz WROS baze podataka, Tablica 14. Vrijednost koeficijenta determinacije nije visoka kao kod EEDI-a, međutim također pokazuje veoma dobru statističku korelaciju. Treba posebno naglasiti da ovakav pristup daje fizikalno ispravniju mjeru emisije  $NO_x$  spojeva nekoga broda, jer ne promatra isključivo motore, već cjelokupan BES.



Slika 37  $NO_x$  referentna ploha bez korekcije  
 $(a = 2,709, b = -0,5465, c = 1,073, R^2 = 0,7169)$



Slika 38  $NO_x$  referentna ploha nakon korekcije, izuzimanja brodova čija vrijednost Procijenjenog  $NO_x$  Indeksa odstupa za više od dvije standardne devijacije  
 $(a = 2,101, b = -0,541, c = 1,139, R^2 = 0,8051)$

## 5.2. Analiza emisije SO<sub>x</sub> spojeva

Prilikom promatranja emisije SO<sub>x</sub> spojeva potrebno je uočiti da je ta emisija na analogni način ovisna o masenom udjelu sumpora u goriva kao što je emisija CO<sub>2</sub> ovisna o masenom udjelu ugljika. To znači da bi *SO<sub>x</sub> indeks* (i *Postignuti* i *Zahtijevani* i *Referentni*) bio razmjern EEDI-u. Omjer bi iznosio:

$$\frac{SO_x \text{ Indeks}}{EEDI} = \frac{S_F}{C_F} \quad (53)$$

pri čemu je:

$S_F$  faktor pretvorbe goriva u SO<sub>2</sub>.

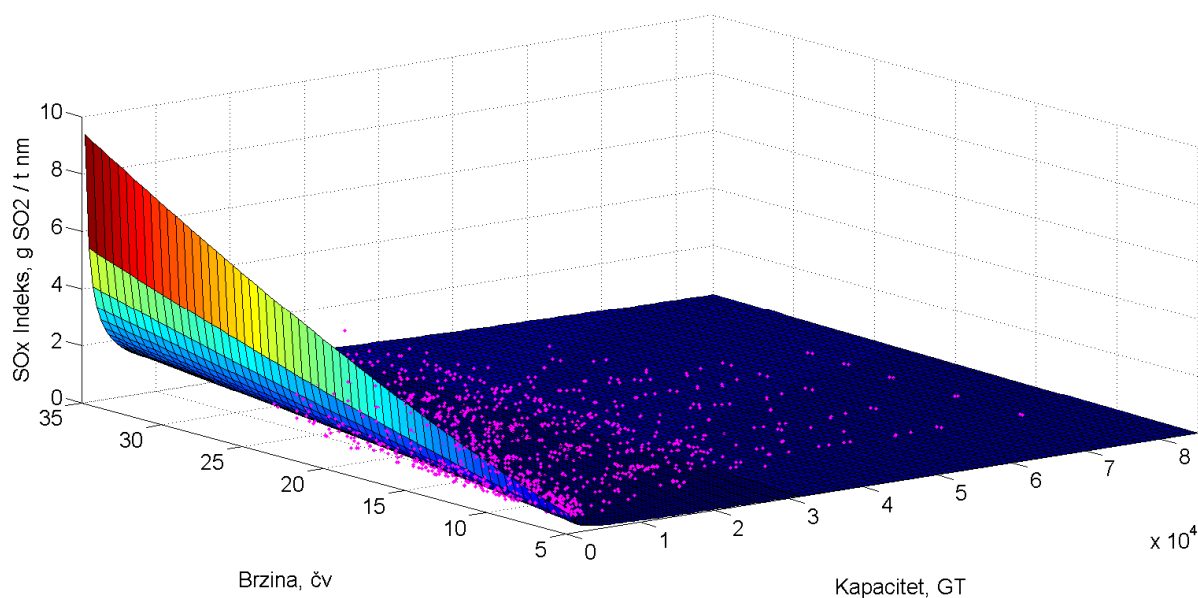
Tablica 38 Faktor pretvorbe goriva u SO<sub>2</sub>

Vrsta goriva	Referenca	Sadržaj sumpora	$S_F$ (kg SO <sub>2</sub> / t goriva)
Plavi dizel (Diesel/Gas Oil)	ISO 8217 gradacija DMX do DMB	10 <sup>-3</sup>	2
Lako dizelsko gorivo ( <i>Light Fuel Oil - LFO</i> )	ISO 8217 gradacija RMA do RMD	0,01	20
Teško dizelsko gorivo ( <i>Heavy Fuel Oil - HFO</i> )	ISO 8217 gradacija RME do RMK	0,035	70
Ukapljeni naftni plin – UNP ( <i>Liquefied Petroleum Gas - LPG</i> )	Propan	0	0
	Butan	0	0
Ukapljeni prirodni plin – UPP ( <i>Liquefied Natural Gas - LNG</i> )	Metan	0	0

Kao i emisije CO<sub>2</sub> i NO<sub>x</sub> spojeva, i emisije SO<sub>x</sub> spojeva su također navedene u EIAPP svjedodžbi. Iako i ugljik i sumpor izgaranjem oslobađaju nezanemarivu toplinu, između ta dva elementa u gorivu je bitna razlika. Već je spomenuto da su primarno gorivo koje koriste BES-i ugljikovodici, kemijski spojevi ugljika i vodika. Ti se spojevi koriste zbog visoke donje ogrjevne vrijednosti. Sumpor zbog brojnih negativnih posljedica pri izgaranju smatra se štetnom primjesom u gorivu. Naime, ovisno o kemijskom sastavu goriva maseni udio ugljika u gorivu može varirati. LNG (koji je primarno metan) ima oko 12% manji maseni udio ugljika u gorivu. Stoga, kako je također već spomenuto, jedan od načina na koji se može smanjiti emisija CO<sub>2</sub> jest korištenjem takvog goriva. Sva ostala goriva na bazi ugljikovodika imaju masene udjele ugljika unutar granica navedenih u Tablica 9.

Međutim, razlike u masenom udjelu sumpora u gorivu su bitno veće. Za teško gorivo maseni udio sumpora je ograničen na 3,5%, Slika 9. To je značajno više od masenog udjela sumpora dozvoljenog prema Euro V normi za cestovna vozila. Prema njoj je dozvoljeni maseni udio sumpora svega 10 ppm, tj. 0,001%. Sumpor u gorivu je primjesa (štetna) koja se pripremom goriva može izdvojiti. Na taj način svaki brod može smanjiti emisije  $\text{SO}_x$  spojeva do veoma niskih razina, dok to isto nije moguće s emisijom  $\text{CO}_2$ . Stoga definiranjem dozvoljene emisije  $\text{SO}_x$  spojeva u ovisnosti o gospodarskom učinku broda ne bi bilo opasnosti od nametanja zahtjeva kojima bi bilo nemoguće udovoljiti, jer bi svaki brod mogao takvim zahtjevima udovoljiti jednostavnim prelaskom na gorivo s manjim masenim udjelom sumpora.

Ovdje je ipak potrebno istaknuti jednu značajnu praktičnu prednost pristupa koji je trenutno definiran u MARPOL-u. Naime, trenutno je definiran maksimalno dozvoljen maseni udio sumpora u gorivu. Stoga brod koji kupuje gorivo zna točno kakvu vrstu goriva smije koristiti i kakvu će kupiti. Ako bi neki brod zahtijevao gorivo s drugačijim udjelom sumpora, upitno je bi li ga našao na tržištu. Moguće rješenje je odsumporavanje goriva na brodu. Takva postrojenja postoje, no to onda otvara pitanje kontrole je li zbilja gorivo korišteno u BES-u bilo odsumporano do tražene razine. Međutim, cilj ovoga istraživanja nije predlaganje nove regulative, već metode za određivanje energetske i ekološke značajke BES-a.



Slika 39  $\text{SO}_x$  Indeks referentna ploha za ro-ro putničke brodove



### 5.3. Definicija indeksa energetske učinkovitosti i ekološke prihvatljivosti

Na temelju vrijednosti *EEDI*-a, *NO<sub>x</sub> Indeksa* i *SO<sub>x</sub> Indeksa*, i uz korištenje faktora normalizacije, Tablica 2, moguće je definirati referentne plohe potencijala globalnog zagrijavanja (*GWP*), Slika 40, acidifikacije (*AP*), Slika 41, i eutrofikacije (*EP*), Slika 42. Potom, na temelju navedenih kategorija utjecaja na okoliš, uz korištenje proračunskog algoritma, Slika 43, i utjecajnih faktora za različite kategorije utjecaja na okoliš, Tablica 3, moguće je definirati i *I4E referentnu plohu*, Slika 44. Primjenom analogne metodologije izuzimanja *Procijenjenih I4E* brodova koji odstupaju za više od dvije standardne devijacije od očekivane vrijednosti moguće je dobiti i korigiranu *I4E referentnu plohu*, Slika 45.

I u ovome je slučaju pretpostavljen analogni oblik *I4E referentne plohe*:

$$I4E \text{ referentna ploha} = a \cdot GT^b \cdot v^c \quad (54)$$

I u ovome je slučaju vrijednost *Postignutog I4E* definirana omjerom ukupne ponderirane emisije štetnih tvari svih prvopokretača pri različitim opterećenjima pomoću *EEDI*-a, *SO<sub>x</sub> Indeksa* i *NO<sub>x</sub> Indeksa*:

$$I4E = 0,095 \cdot EEDI + 33,9 \cdot NO_x \text{ Indeks} + 18,3 \cdot SO_x \text{ Indeks} \quad (55)$$

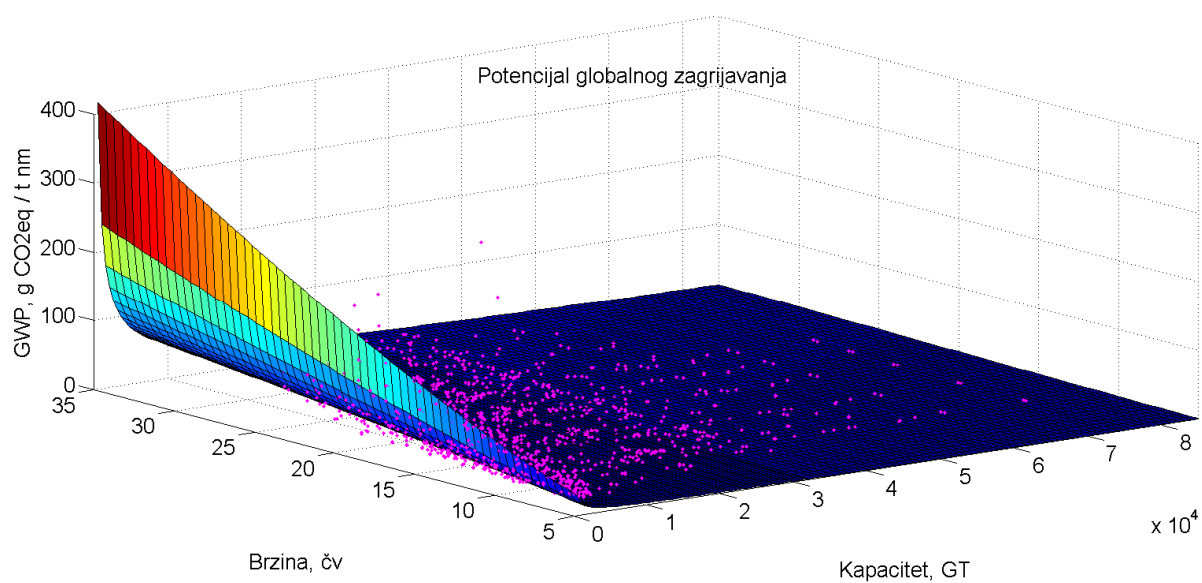
$$I4E_{100} = \frac{\sum 0,095 \cdot \text{Emisija } CO_{2,100} + 33,9 \cdot \text{Emisija } NO_{x,100} + 18,3 \cdot \text{Emisija } SO_{x,100}}{\text{Kapacitet} \cdot V_{100}} \quad (56)$$

$$I4E_{75} = \frac{\sum 0,095 \cdot \text{Emisija } CO_{2,75} + 33,9 \cdot \text{Emisija } NO_{x,75} + 18,3 \cdot \text{Emisija } SO_{x,75}}{\text{Kapacitet} \cdot V_{75}} \quad (57)$$

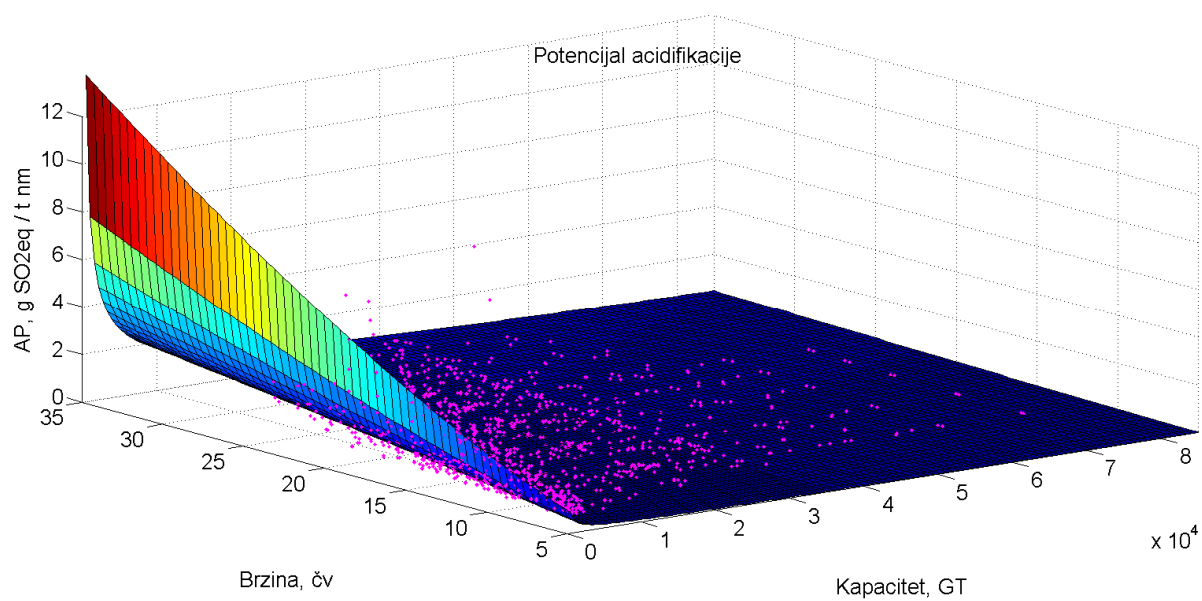
$$I4E_{50} = \frac{\sum 0,095 \cdot \text{Emisija } CO_{2,50} + 33,9 \cdot \text{Emisija } NO_{x,50} + 18,3 \cdot \text{Emisija } SO_{x,50}}{\text{Kapacitet} \cdot V_{50}} \quad (58)$$

$$I4E_{25} = \frac{\sum 0,095 \cdot \text{Emisija } CO_{2,25} + 33,9 \cdot \text{Emisija } NO_{x,25} + 18,3 \cdot \text{Emisija } SO_{x,25}}{\text{Kapacitet} \cdot V_{25}} \quad (59)$$

$$I4E_{10} = \frac{\sum 0,095 \cdot \text{Emisija } CO_{2,10} + 33,9 \cdot \text{Emisija } NO_{x,10} + 18,3 \cdot \text{Emisija } SO_{x,10}}{\text{Kapacitet} \cdot V_{10}} \quad (60)$$

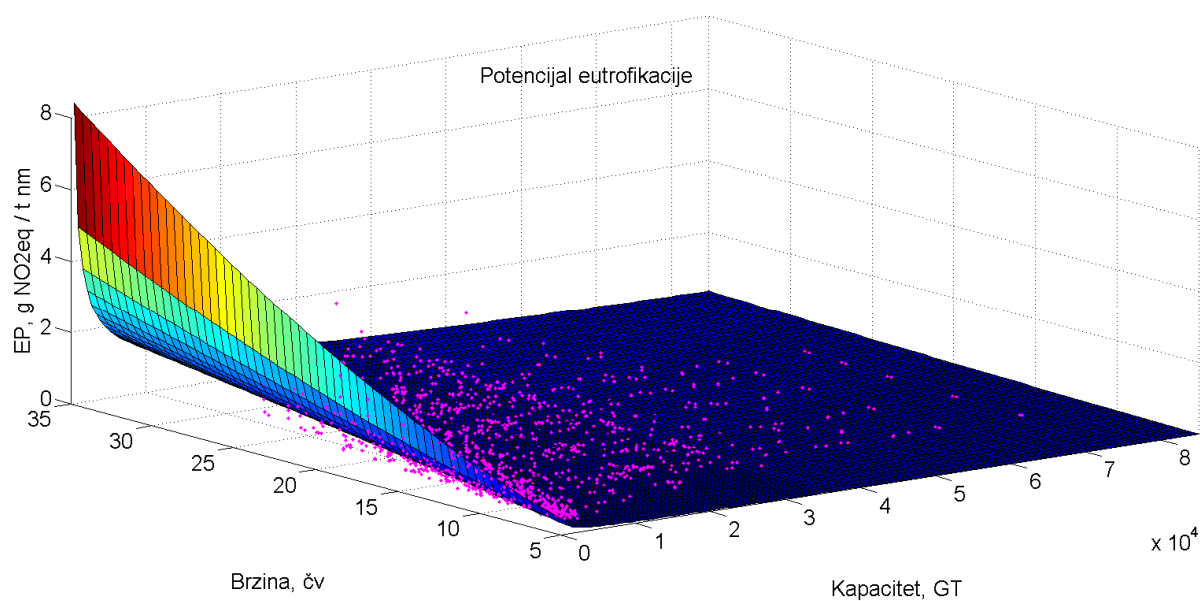


Slika 40 Referentna ploha potencijala globalnog zagrijavanja ro-ro putničkih brodova

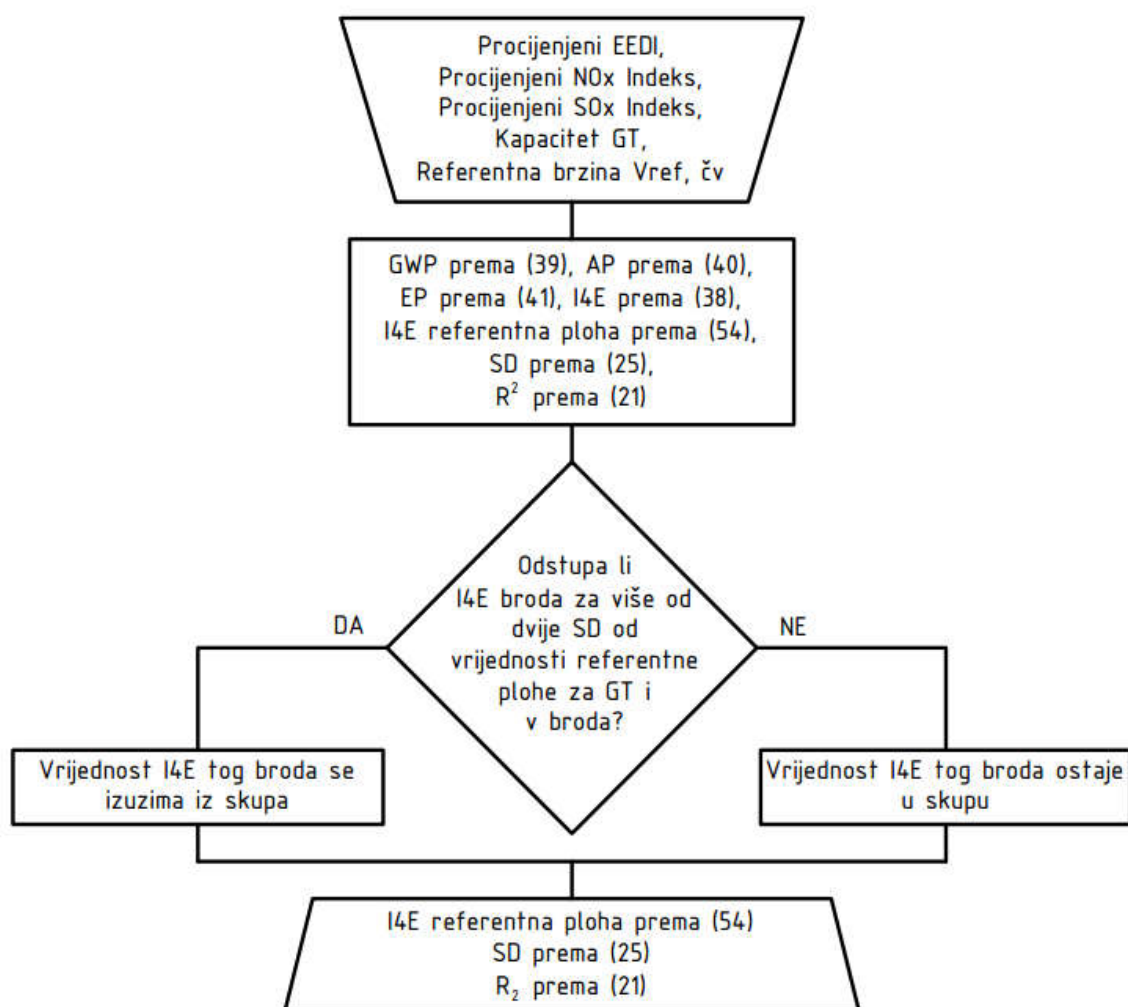


Slika 41 Referentna ploha potencijala acidifikacije ro-ro putničkih brodova

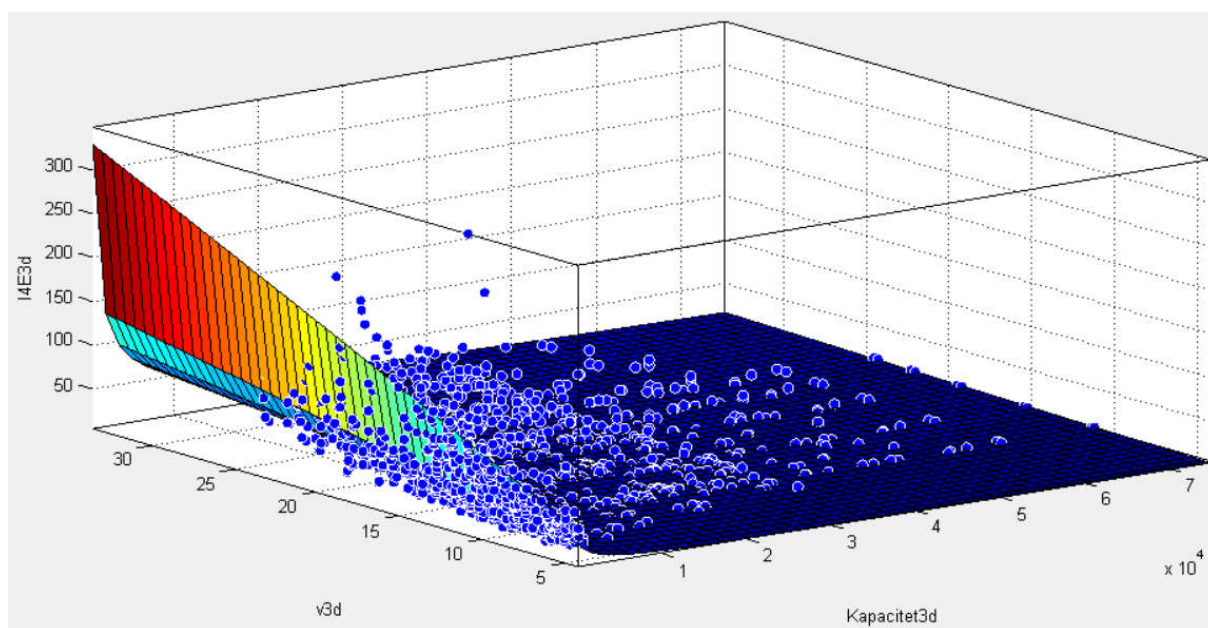




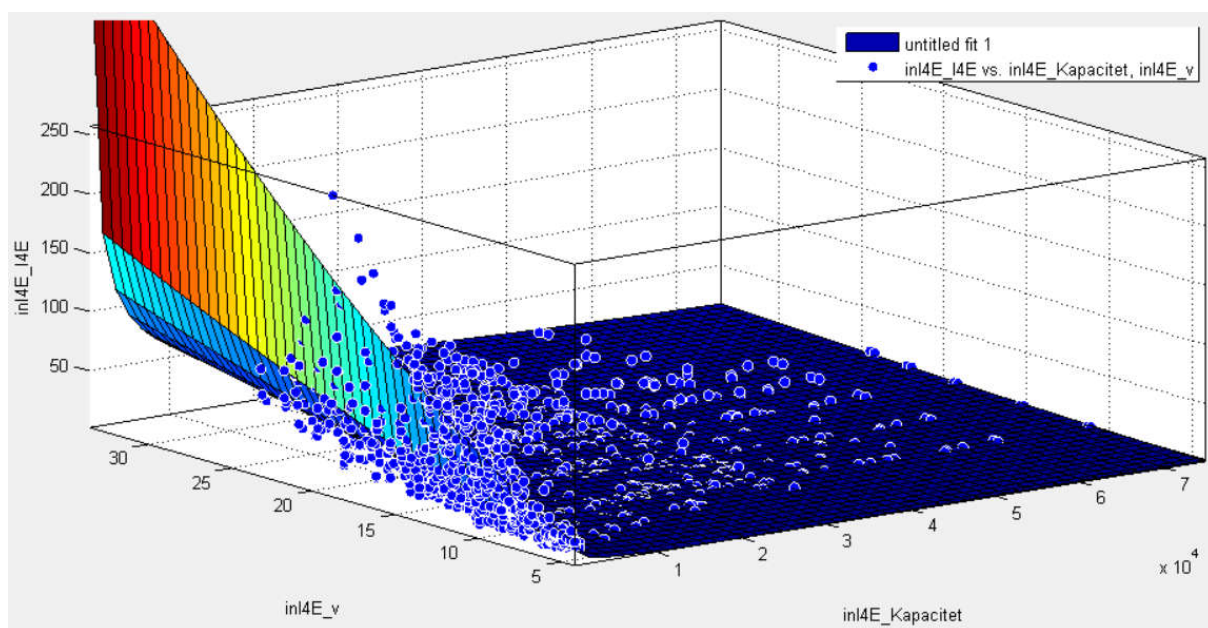
Slika 42 Referentna ploha potencijala eutrofikacije ro-ro putničkih brodova



Slika 43 Proračunski algoritam za određivanje *I4E referentne plohe*



Slika 44 *I4E referentna ploha* prije korekcije  
 $(a = 352,1, b = -0,5756, c = 0,9668, R^2 = 0,7358)$



Slika 45 *I4E referentna ploha* nakon korekcije, izuzimanja brodova čija vrijednost  
*Procijenjenog I4E* odstupa za više od dvije standardne devijacije  
 $(a = 266,4, b = -0,5688, c = 1,036, R^2 = 0,8403)$

Koeficijent determinacije *I4E referentne plohe* iznosi 0,84. Iz toga se zaključuje da *I4E referentna ploha* veoma dobro opisuje značajke energetske učinkovitosti i ekološke prihvatljivosti ro-ro putničkih brodova.

#### 5.4. Analiza osjetljivosti

Kao provjeru osjetljivosti predloženog indeksa o energetske i ekološke značajkama BES-a, bit će provedena analiza čiji je cilj utvrditi promjenu iznosa *I4E*-a za zadanu promjenu emisija CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub> i NO<sub>x</sub> spojeva.

Za već promatrani brod „Juraj Dalmatinac“ moguće je odrediti referentne vrijednosti *I4E*, *GWP*, *AP*, i *EP* za različite stanja plovidbe, Tablica 39. Također je moguće odrediti i koliki utjecaj na *I4E* ima smanjenje *EEDI*-a, *NO<sub>x</sub> Indeksa* i *SO<sub>x</sub> Indeksa*, Tablica 40.

Tablica 39 Referentne vrijednosti za m/t „Juraj Dalmatinac“, 3193 GT

Opterećenje / brzina	<i>GWP</i>	<i>AP</i>	<i>EP</i>	<i>I4E</i>
100% / 13 čv	28,17	0,9075	0,5287	30,32
75% / 11,8 čv	24,71	0,7913	0,4548	26,31
50% / 10,3 čv	20,56	0,653	0,3682	21,55
25% / 8,2 čv	15,1	0,4733	0,2583	15,42
10% / 6,0 čv	9,89	0,3048	0,159	9,75

Tablica 40 Utjecaj na *I4E* smanjenje od 10% *EEDI*-a, *NO<sub>x</sub> Indeksa* i *SO<sub>x</sub> Indeksa*

Opterećenje / brzina	100% / 13 čv	75% / 11,8 čv	50% / 10,3 čv	25% / 8,2 čv	10% / 6,0 čv
Smanjenje <i>EEDI</i> -a 10%	0,88	0,89	0,91	0,93	0,97
Smanjenje <i>NO<sub>x</sub> Indeksa</i> 10%	4,38	4,34	4,29	4,21	4,1
Smanjenje <i>SO<sub>x</sub> Indeksa</i> 10%	4,74	4,77	4,8	4,86	4,93

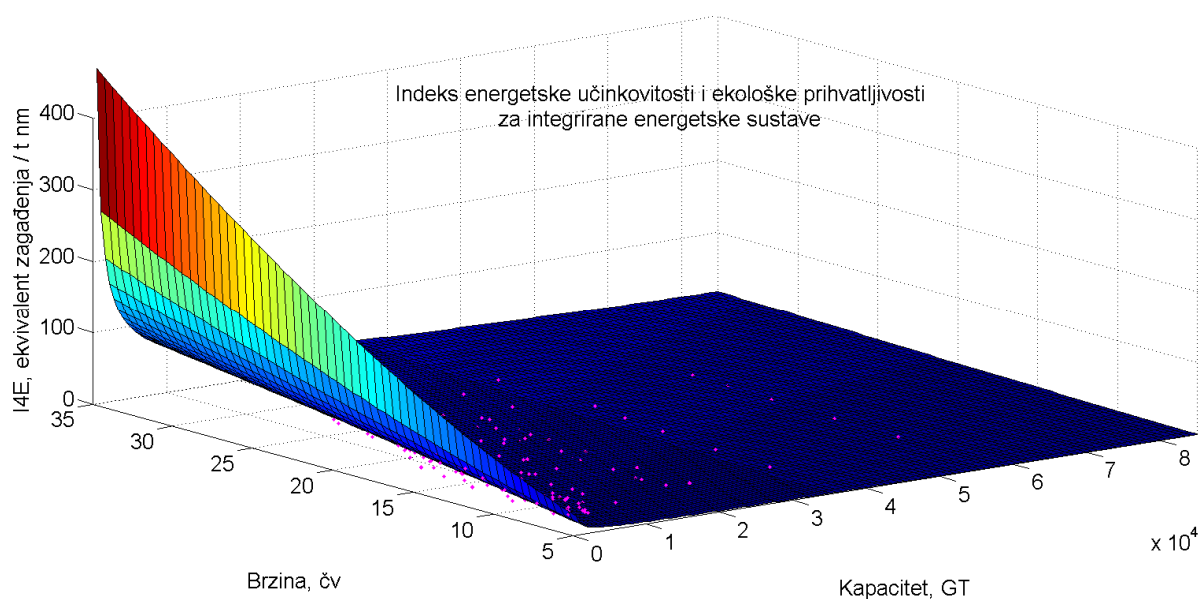
Iz analize je vidljivo da emisija NO<sub>x</sub> i SO<sub>x</sub> spojeva ima 4-5 puta veći utjecaj na okoliš od emisije CO<sub>2</sub> za ovako definirane faktore normalizacije, Tablica 2, i utjecajne faktore, Tablica 3. Također je vidljivo da pri manjim opterećenjima emisija NO<sub>x</sub> spojeva manje utječe na okoliš, jer u tim slučajevima dolazi do povećanja specifične potrošnje goriva, te veće specifične emisije CO<sub>2</sub> i SO<sub>x</sub> spojeva.

## 5.5. Energetske i ekološke značajke integriranih energetske sustava

Primjenom predložene metodologije određivanja  $I4E$  moguće je procijeniti energetske učinkovitost i ekološku prihvatljivost brodova s IES-ima u postojećoj floti ro-ro putničkih brodova. U sklopu ove analize promatrani su brodovi građeni unazad 15 godina. Od ukupno 384 ro-ro putnička broda izgrađena u to vrijeme, 48 brodova ima IES. Budući da je za svaki od tih brodova računato 5 stanja opterećenja BES-a prema (56) – (60), ukupno je izračunato 240  $I4E$  za te brodove. Od toga je 146 vrijednosti  $I4E$ , odnosno nešto više od 60% ispod  $I4E$  referentne plohe, tj. ispod prosjeka flote, Slika 46. Ako bi se promatrale prosječne vrijednosti  $I4E$ , na analogan način kako je predloženo u poglavlju 4.3.3, prema:

$$\begin{aligned} I4E_{\text{prosjeck}} &= f_{100} I4E_{100} + f_{75} I4E_{75} + f_{50} I4E_{50} + f_{25} I4E_{25} + f_{10} I4E_{10} \\ &= 0,05 \cdot I4E_{100} + 0,25 \cdot I4E_{75} + 0,25 \cdot I4E_{50} + 0,15 \cdot I4E_{25} + 0,3 \cdot I4E_{10} \end{aligned} \quad (61)$$

moglo bi se odrediti je li  $I4E$  broda u prosjeku ispod  $I4E$  referentne plohe. Rezultati takve analize su prikazani tablično, Tablica 41. Ta je analiza pokazala da 29 od 48 brodova (60,5%) s IES-om ima prosječni  $I4E$  ispod  $I4E$  referentne plohe. Iz toga je razvidno da je utjecaj na okoliš brodova s IES-om u pravilu niži. Ovdje je ponovno potrebno naglasiti da postoji mogućnost da su pojedini podaci unutar WROS baze podataka pogrešni, čime bi se mogli objasniti slučajevi u kojima  $I4E$  značajno odstupa od referentne vrijednosti.



Slika 46 IES-i u  $I4E$  referentnoj plohi

Tablica 41 Vrijednosti prosječnih *I4E* za ro-ro putničke brodove s IES-om

Kapacitet, GT	Brzina pri 75%	Prosječni <i>I4E</i> , ekv. / t nm	Prosječni referentni <i>I4E</i> , ekv. / t nm	Odstupanje od prosječka <i>I4E</i> , %
499	9	109,3	58,7	86,2
499	9,5	77,4	62,1	24,6
658	11	89,0	61,7	44,1
777	11	33,6	56,2	-40,2
1574	12	44,7	41,1	8,6
1910	13	34,3	40,0	-14,4
2055	14	19,4	41,5	-53,3
2055	14	20,0	41,5	-51,7
2232	13	26,5	36,6	-27,7
2878	15	21,9	36,8	-40,4
2971	11	42,4	26,2	61,9
2971	11	42,4	26,2	61,9
2971	11	50,1	26,2	91,2
2971	11	50,1	26,2	91,2
2989	13	32,3	31,0	4,1
3652	16	25,9	34,3	-24,4
4500	12	29,0	22,6	28,3
4500	16	21,8	30,5	-28,6
4630	16	22,4	30,0	-25,5
4893	13	28,4	23,5	21,1
4893	13	28,4	23,5	21,1
5233	15	24,0	26,2	-8,4
5233	15	24,0	26,2	-8,4
5233	15	24,0	26,2	-8,4
6655	15	21,1	22,8	-7,5
6904	21	27,0	31,7	-14,7
6904	21	23,3	31,7	-26,5
6904	21	23,3	31,7	-26,5
6994	17	33,0	25,3	30,6
6994	17	30,4	25,3	20,2
7536	21	20,0	30,1	-33,7
8680	19,2	16,7	25,4	-34,0

9292	17	11,5	21,5	-46,5
9292	17	11,5	21,5	-46,5
11647	15	16,3	16,6	-1,7
16810	30,5	29,4	28,1	4,4
16810	30,5	32,5	28,1	15,6
21777	18	14,6	14,1	3,8
21777	21	12,5	16,5	-24,2
21777	21,7	12,1	17,1	-29,1
24975	18	9,6	13,0	-26,3
24975	18	8,8	13,0	-32,7
25040	18	9,7	13,0	-24,9
34326	29,4	6,4	18,0	-64,6
34326	29,4	6,4	18,0	-64,6
36468	18,5	15,7	10,8	45,4
36468	18,5	15,7	10,8	45,4
57565	21,8	7,8	9,9	-21,1

Ovom analizom je prikazano realno stanje utjecaja ro-ro putničkih brodova s IES-om na okoliš. Pokazano je ne samo da brodovi s IES-om mogu biti energetske učinkovitiji i ekološki prihvatljiviji, već da u pravilu i jesu energetske učinkovitiji i ekološki prihvatljiviji od brodova s konvencionalnim BES-om, čime je potvrđena i treća hipoteza doktorskog rada.



## 6. ZAKLJUČAK

### 6.1. Zaključna razmatranja doktorskog rada

U sklopu ovoga doktorata potvrđene su postavljene hipoteze čime je ispunjen cilj istraživanja te ostvaren očekivani znanstveni doprinos.

U uvodu doktorata u poglavlju 1 dan je kratki osvrt na globalne emisije štetnih plinova te značaj povećanja energetske učinkovitosti i ekološke prihvatljivosti brodova u cilju smanjenja tih emisija. Integrirani energetske sustavi su predloženi kao jedan od mogućih načina ispunjenja tog cilja. Također je navedeno da trenutno važeća metodologija ocjene energetske učinkovitosti broda nije primjenjiva na te sustave te stoga nije moguće dati ispravnu ocjenu tih sustava sa stajališta energetske učinkovitosti i ekološke prihvatljivosti.

U poglavlju 2 je postavljen cilj istraživanja, kao i hipoteze koje je potrebno dokazati kako bi cilj bio ispunjen. Također su prikazani plan i metodologija istraživanja, te postavljen očekivani znanstveni doprinos.

U poglavlju 3 definirani su pojmovi energetske učinkovitosti i ekološke prihvatljivosti broda. Također je naglašena razlika tih pojmova u odnosu na pojam korisnosti. Na temelju tih definicija i uz brojne primjere je pokazano da povećanje energetske učinkovitosti ne vodi nužno i do povećanje ekološke prihvatljivosti broda čime je potvrđena prva hipoteza u sklopu ovoga doktorata.

U poglavlju 4 sadašnji pristup ocjeni energetske učinkovitosti broda je unaprijeđen predlaganjem nove metodologije određivanja *Postignutog* i *Zahtijevanog EEDI*-a. Predloženo je da se *Postignuti EEDI* određuje u više radnih točaka pri čemu se promatraju svi prvopokretači koji utječu na emisiju CO<sub>2</sub> u ovisnosti o njihovom stvarnom opterećenju. Također je predloženo proširenje *EEDI referentne krivulje* u *EEDI referentnu plohu* te novi „dinamički“ pristup definiranja faktora smanjenja *X*. Time je predloženi pristup primjenjiv i za IES-e, čime je potvrđena i druga hipoteza ovoga doktorata.

U poglavlju 5 predložen je novi pristup definiranja energetske učinkovitosti i ekološke prihvatljivosti broda kroz *Indeks energetske učinkovitosti i ekološke prihvatljivosti (Index of Energy Efficiency and Environmental Eligibility – I4E)*. *I4E* promatra emisije CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> i SO<sub>x</sub> spojeva s broda. Primjenom takvoga pristupa moguće je dati integralnu ocjenu utjecaja na okoliš različitih konfiguracija BES-a. Primjenom metodologije za proračun *I4E* na postojeću

flotu ro-ro putničkih brodova pokazano je da su brodovi s IES-om u pravilu energetski učinkovitiji i ekološki prihvatljiviji, čime je potvrđena i treća hipoteza ovoga doktorata.

Dokazivanjem postavljenih hipoteza ispunjen je cilj istraživanja, odnosno provedena je analiza energetske i ekološke značajke brodskih IES-a i njihove međusobne povezanosti, te predložen model za ocjenu doprinosa različitih konfiguracija ukupnoj energetske učinkovitosti i ekološkoj prihvatljivosti broda. Također je ostvaren i očekivani znanstveni doprinos jer je pokazano da razvijeni računalni model može biti korišten za usporedbu integralnog utjecaja na okoliš različitih konfiguracija IES-a. To stvara preduvjete za unapređenje projektnih rješenja IES-a te povećanja energetske učinkovitosti i ekološke prihvatljivosti brodova.



## 6.2. Smjernice za daljnja istraživanja

Dosadašnji pristup ocjeni energetske učinkovitosti brodova je jednostran i ne daje ispravnu sliku utjecaja broda na okoliš. Predloženim pristupom moguće je dati tu ocjenu za ro-ro putničke brodove. Sljedeći korak bi bio primijeniti predloženi pristup i na ostale tipove brodova. Budući da su posebnosti velikih trgovačkih brodova manje izražene, ne bi trebalo biti problema pri primjeni predloženog pristupa.

Budući da je cilj *I4E* dati integralnu ocjenu utjecaja broda na okoliš, on promatra emisiju tri najznačajnije štetne tvari (po količini i štetnosti): CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> i SO<sub>x</sub> spojeva. *I4E* bi se mogao i proširiti na način da obuhvati još neku emisiju koja bi mogla imati štetan utjecaj na okoliš, pri čemu se ne bi trebalo ograničavati na emisije štetnih tvari. To bi posebno bilo zanimljivo za neka osjetljiva područja (poput nacionalnih parkova) i emisije koje imaju izraženi lokalni karakter djelovanja, kao što je emisija buke koja u nekim područjima ima izražen negativni utjecaj na pomorski ekosustav.

Posebno bi bilo zanimljivo proširiti *I4E* na način da uzima u obzir i ekonomsku komponentu. To je u skladu s namjerama MEPC-a da usvoji tržišne mjere povećanja energetske učinkovitosti (*MBM*). U tom bi slučaju i brodovlasnici imali značajan (ekonomski) interes povećanja energetske učinkovitosti i ekološke prihvatljivosti brodova što bi u konačnici dovelo do smanjivanja onečišćenja pomorskog okoliša.

## 7. LITERATURA

- [1] Europska Komisija: *Strategic goals and recommendations for the EU's maritime transport policy until 2018*, Brussels, 2009.
- [2] Panteia: *Contribution to impact assessment of measures for reducing emissions of inland navigation*, Zoetermeer, 2013.
- [3] J. Shaw: *Propulsion – Is LNG the Future*, Pacific Maritime Magazine 31/5, 2013.
- [4] MEPC 59/INF.10: *2nd IMO GHG Study*, IMO, 2009.
- [5] J. Faber, A. Markowska, D. Nelissen, M. Davidson, V. Eyring, I. Cionni, E. Selstad, P. Kågeson, D. Lee, Ø. Buhaug, H. Lindtsad, P. Roche, E. Humpries, J. Graichen, M. Cames, W. Schwarz: *Technical support for European action to reducing Greenhouse Gas Emissions from international maritime transport*, Delft, 2009
- [6] L. Runko Luttenberger, I. Ančić, A. Šestan: *The viability of Short-Sea Shipping in Croatia*, Brodogradnja – časopis brodogradnje i brodograđevne industrije 64-4, str. 472-481, 2013.
- [7] Det Norske Veritas: *Screening Life Cycle Assessment of M/V Color Festival*, 1999.
- [8] IPCC Climate Change 2001: *Working Group III: Mitigation*, 2001.
- [9] H. Lindstad, B. E. Asbjornslett, A. H. Stromman: *The importance of economies of scale for reductions in greenhouse gas emissions from shipping*, Energy Policy 46, str. 386–398, 2012.
- [10] V. Eyring, I. S.A. Isaksen, T. Berntsen, W. J. Collins, J. J. Corbett, O. Endresen, R. G. Grainger, J. Moldanova, H. Schlager, D. S. Stevenson: *Transport impacts on atmosphere and climate: Shipping*, Atmospheric Environment 44, str. 4735–4771, 2010.
- [11] M. Meinhausen, B. Hare, T.M.L. Wigley, D. Van Vuuren, M.G.J. Den Elzenm, R. Swart: *Multi-gas emission pathways to meet climate targets* Climate Change 75, 151–194, 2006.

- [12] A. Markandya, M. Gonzalez-Eguino, P. Criqui, S. Mima: *Low climate stabilisation under diverse growth and convergence scenarios*, Energy Policy 64, str. 288-301, 2014.
- [13] I. Ančić, A. Šestan: *Influence of the required EEDI reduction factor on the CO<sub>2</sub> emission from bulk carriers*, Energy Policy 84, str. 107-116, 2015.
- [14] Royal Academy of Engineering: *Future Ship Powering Options: Exploring alternative methods of ship propulsion*, ISBN: 978-1-909327-01-6, London, 2013.
- [15] J. Miller, D. Santosusso, M. Uva, B. Fitzpatrick: *Naval Superconducting Integrated Power System (SIPS)*, Intelligent Ship Symposium, 2013.
- [16] K. T. Chau, Y. S. Wong: *Overview of power management in hybrid electric vehicles*, Energy Conversion and Management 43, str. 1953-1968, 2002.
- [17] Rezolucija MEPC.212(63): *2012 Guidelines on the Method of Calculation of the Attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for New Ships*, IMO, 2012.
- [18] National Risk Management Research Laboratory: *Life Cycle Assessment: Principles and Practice*, EPA/600/R-06-060, Cincinnati, SAD, 2006.
- [19] Environmental Protection Agency: *Nitrogen Oxides (NO<sub>x</sub>), why and how they are controlled*, EPA 456/F-99-006R, North Carolina, SAD, 1999.
- [20] J. Shi, T. Li, Z. Liu, H. Zhang, S. Peng, Q. Jiang, J. Yin: *Life Cycle Environmental Impact Evaluation of Newly Manufactured Diesel Engine and Remanufactured LNG Engine*, Procedia CIRP 29, str. 402-407, 2015.
- [21] S. Alkaner, P. Zhou: *A comparative study on life cycle analysis of molten carbon fuel cells and diesel engines for marine application*, Journal of Power Sources 158, str. 188-199, 2006.
- [22] Rezolucija MEPC.176(58): *Amendments to the Annex of the Protocol of 1997 to Amend the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as modified by the Protocol of 1978 relating thereto (Revised MARPOL Annex VI)*, IMO, 2010.

- [23] Rezolucija MEPC.177(58): *Amendments to the Technical Code on Control of Emission of Nitrogen Oxides from Marine Diesel Engines (NO<sub>x</sub> Technical Code 2008)*, IMO, 2008
- [24] Rezolucija MEPC.190(60): *Amendments to the annex of the Protocol of 1997 to Amend the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as modified by the Protocol of 1978 relating thereto (North American Emission Control Area)*, IMO, 2011.
- [25] Rezolucija MEPC.202(62): *Amendments to the Annex of the Protocol of 1997 relating to the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973 (Designation of the Caribbean Sea Emission Control Area)*, IMO, 2013.
- [26] MEPC 62/INF.7: *Reduction of GHG from Ships: Marginal Abatement Costs and Cost Effectiveness of Energy-Efficiency Measures*, Submitted by Institute of Marine Engineering, Science and Technology (IMarEST), IMO, 2011.
- [27] Haifeng Wang: *The Reduction Cost of GHG from Ships and its Impact on Transportation Cost and International Trade*, doktorska disertacija, University of Delaware, 2010.
- [28] MEPC 61/INF.2: *Full report of the work undertaken by the Expert Group on Feasibility Study and Impact Assessment of possible Market-based Measures*, Secretariat, IMO, 2010.
- [29] MEPC 60/INF.21 *Scientific study on international shipping and market-based instruments*, Secretariat, IMO, 2010.
- [30] Rezolucija MEPC.203(62): *Amendments to the Annex of the Protocol of 1997 to Amend the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as modified by the Protocol of 1978 relating thereto (Inclusion of regulations on energy efficiency for ships in MARPOL Annex VI)*, IMO, 2011.
- [31] Rezolucija MEPC.213(63): *2012 Guidelines for the Development of a Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP)*, IMO, 2012.
- [32] Rezolucija 215(63): *Guidelines for Calculation of Reference Lines for Use with the Energy Efficiency Design Index (EEDI)*, IMO, 2012.

- [33] MEPC 62/6/4: *Calculation of parameters for determination of EEDI reference values*, Secretariat, IMO, 2011.
- [34] Rezolucija MEPC.231(65): *2013 Guidelines for Calculation of Reference Lines for Use with the Energy Efficiency Design Index (EEDI)*, IMO, 2013.
- [35] Rezolucija MEPC.251(66): *Amendments to the Annex of the Protocol of 1997 to Amend the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as modified by the Protocol of 1978 relating thereto (Amendments to MARPOL Annex VI and the NO<sub>x</sub> Technical Code 2008)*, IMO, 2014.
- [36] Rezolucija MEPC.245(66): *2014 Guidelines on the Method of Calculation of the Attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for New Ships*, IMO, 2014.
- [37] Rezolucija MEPC.214(63): *2012 Guidelines on Survey and Certification of the Energy Efficiency Design Index (EEDI)*, IMO, 2012.
- [38] GHG-WG 2/2/10: *Comments on the draft Interim Guidelines on the Method of Calculation of the Energy*, China, IMO, 2009.
- [39] I. Ančić, A. Šestan, N. Vladimir: *EEDI as a design criterion for RO-PAX ships power plant - current status and future challenges*, 11th International Conference on Marine Sciences and Technologies - Black Sea 2012, Varna, 2012.
- [40] MEPC.1/Circ.815: *2013 Guidance on Treatment of Innovative Energy Efficiency Technologies for Calculation and Verification of the Attained EEDI*, IMO, 2013.
- [41] I. Ančić, A. Šestan, N. Vladimir: *EEDI kao mjera energetske učinkovitosti broda*, XX. simpozij Teorija i praksa brodogradnje in memoriam prof. Leopold Sotra, Zagreb, 2012.
- [42] I. Ančić, A. Šestan, N. Vladimir: *EEDI Calculation for Passenger and Ro-Pax Ships*, RINA Design & Operation of Passenger Ships Conference, London, 2013.
- [43] Deltamarine: *Study on tests and trials of the Energy Efficiency Design Index as developed by the IMO*, Raisio, 2011.
- [44] Centre for Maritime Technology and Innovation: *Energy efficiency of small ships and non conventional propelled ships*, Zoetermeer, 2010.

- [45] H. Lindstad, B. E. Asbjornslett, A. H. Stromman: *Reductions in greenhouse gas emissions and cost by shipping at lower speeds*, Energy Policy 39, str. 3456–3464, 2011.
- [46] C. Walsh, A. Bows: *Size matters: Exploring the importance of vessel characteristics to inform estimates of shipping emissions*, Applied Energy, Vol. 98, str. 128–137, 2012.
- [47] L. R. Luttenberger, I. Ančić, A. Šestan, N. Vladimir: *Integrated power systems in small passenger ships*, World Electric & Hybrid Boat Summit – PlugBoat 2013, Nica, 2013.
- [48] MEPC 67/INF.3: *Third IMO GHG Study 2014*, IMO, 2009
- [49] Agencija za obalni linijski pomorski promet: *Promet putnika i vozila na državnim linijama: usporedba 2014/2015*, [http://www.agencija-zolpp.hr/Portals/12/download/Promet\\_putnika\\_i\\_vozila\\_2014-2015.pdf](http://www.agencija-zolpp.hr/Portals/12/download/Promet_putnika_i_vozila_2014-2015.pdf), 2015
- [50] Hrvatski registar brodova: *Pravila za tehnički nadzor pomorskih brodova: Dio 1. – Opći propisi*, Split, 2011.
- [51] IHS: “*World Register of Ships – WROS manual*”, 2015.
- [52] MEPC 60/4/7: *Guidelines for calculation of baselines for use with the Energy Efficiency Design Index*, Danska i Japan, IMO, 2009.
- [53] MEPC 61/5/3: *Report of the outcome of the Intersessional Meeting of the Working Group on Energy Efficiency Measures for Ships*, Tajništvo, IMO, 2010.
- [54] MEPC 64/4/14: *Proposal for the inclusion of the ro-ro cargo and ro-ro passenger ship types into the energy efficiency regulatory framework*, Njemačka, Švedska i Community of European Shipyards' Associations (CESA), IMO, 2012.
- [55] [http://img.nauticexpo.com/images\\_ne/photo-g/31774-5601485.jpg](http://img.nauticexpo.com/images_ne/photo-g/31774-5601485.jpg)
- [56] M. M. Pease: *Planning for Uncertainty: A Comparative Analysis of Alternative Fuels for Freight Shipping Companies*, doktorska disertacija, University of Wisconsin-Madison, 2010.

- [57] M. El Gohary, I Seddiek, A Salem: *Overview of alternative fuels with emphasis on the potential of liquefied natural gas as future marine fuel*, Journal of Engineering for the Maritime Environment 229-4, str. 365-375, 2015.
- [58] J. Romero, J. Orosa, A. Oliveira: *Research on the Brayton cycle design conditions for reliquefaction cooling of LNG boil off*, Journal of Marine Science and Technology Vol. 17, str. 532-541, 2012.
- [59] MEPC 64/4/26: *Development of EEDI reference line for LNG carriers*, Submitted by Japan, Liberia and the Society of International Gas Tanker and Terminal Operators (SIGTTO), IMO, 2012.
- [60] F. Adamchak, A. Adede: *LNG as Marine Fuel*, International Conference & Exhibition on Liquefied Natural Gas – LNG 17, 2013.
- [61] Y. Welaya, M. El Gohary, N. Ammar: *A comparison between fuel cells and other alternatives for marine electric power generation*, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Vol. 3, str. 141-149, 2011.
- [62] I. Ančić, A. Šestan, N. Vladimir, V. Klisarić: *Influence of New Power Sources on the Attained EEDI*, Influence of EEDI on ship design, RINA, London, UK, 2014.
- [63] M. El Gohary, I. S. Seddiek: *Utilization of alternative marine fuels for gas turbine power plant onboard ships*, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Vol. 5, str. 21-32, 2013.
- [64] Y. Welaya, M. Mosleh, N. Ammar: *Thermodynamic analysis of a combined gas turbine power plant with a solid oxide fuel cell for marine applications*, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Vol. 5, str. 529-545, 2013.
- [65] Q. Li: *Crossover of thickness dependence of critical current density  $J_c(T,H)$  in  $YBa_2Cu_3O_{7-d}$  thick films*, Applied Physics Letters, Vol 84, No18, 2004.
- [66] S. Kim: *AC Loss Analysis of HTS Power Cable With RABiTS Coated Conductor*, Applied Superconductivity, IEEE Transactions, 2012.
- [67] V. M. Fthenakis, H. C. Kim: *Greenhouse-gas Emissions from Solar Electric- and Nuclear Power: A Life-cycle Study*, Energy Policy 35, str. 2549-2557, 2007.

- [68] B. Guezuraga, R. Zauner, W. Pölz: *Life cycle assessment of two different 2 MW class wind turbines*, Renewable Energy 37, str. 37-44, 2012.
- [69] Caterpillar: *C18 Marine Engine Technical File for IMO II: Engine Family ACPXW18.IPA2*, SAD, 2010.
- [70] Caterpillar: *C32 Marine Engine Technical File for IMO II: Engine Family ACPXW32.IPA2*, SAD, 2010.



## ŽIVOTOPIS DOKTORANDA

Ivica Ančić rođen je 31. kolovoza 1987. godine u Zagrebu gdje je završio V. Gimnaziju. 2006. godine je upisao Fakultet strojarstva i brodogradnje (FSB), studij strojarstva, a 2011. je diplomirao „*cum laude*“ na brodstrojarском smjeru.

U prosincu 2011. zaposlio se na FSB-u suradničkom zvanju i radom mjestu asistenta, za područje tehničkih znanosti, znanstveno polje strojarstvo, znanstvenu granu brodsko strojarstvo na Zavodu za brodogradnju i pomorsku tehniku.

U akademskoj godini 2011./2012. upisao je i poslijediplomski doktorski studij na FSB-u, smjer brodogradnja i pomorska tehnika. Na poslijediplomskom doktorskom studiju je položio sve ispite te obranio konačnu temu doktorata „*Energetska učinkovitost i ekološka prihvatljivost brodskih integriranih energetske sustava*“ pod mentorstvom prof. dr. sc. Ante Šestana. Znanstveni doprinos tog doktorskog rada je sadržan u unapređenju metoda ocjenjivanja energetske i ekološke značajke brodova.

Do sada je objavio 11 znanstvenih radova, od čega 3 u znanstvenim časopisima A kategorije, a 8 na međunarodnim znanstvenim konferencijama. U 2012. godini sudjelovao je na industrijskom projektu „*Proračun i analiza Postignutog EEDI-a motornog broda Stoja*“ u suradnji s brodogradilištem Uljanik. U 2015. godini sudjelovao je na znanstvenom projektu „*Sunčana vodikova punionica*“ s dr. sc. Ankićem Đukić.

Trenutno je voditelj međunarodnog znanstvenog projekta „*Utjecaj inovativnih energetske učinkovitih tehnologija na emisije stakleničkih plinova brodova – EKO-BROD*“ financiranom od ESF-a i MZOS-a.

Član je dva najvažnija međunarodna udruženja iz područja brodstrojarstva, „*Royal Institution of Naval Architects*“ (RINA) iz Londona, UK, i „*Society of Naval Architects and Marine Engineers*“ (SNAME) iz Alexandrie, SAD. Od 2013. do 2015. godine bio je predstavnik asistenata i viših asistenata u Fakultetskom vijeću FSB-a.

Aktivno se služi engleskim i njemačkim jezikom.

## BIOGRAPHY OF THE PhD CANDIDATE

Ivica Ančić was born on 31st August 1987 in Zagreb, Croatia, where he finished the high school „V. Gymnasium“. In 2006 he enrolled in the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture (UNIZAG FSB). In 2011 he finished the master degree in Marine Engineering with honors.

The same year he became a research assistant at the Department of Naval Architecture and Offshore Engineering at UNIZAG FSB and enrolled in PhD study in the Marine Engineering. He passed all the exams and he is preparing his PhD thesis on the subject of “Energy Efficiency and Environmental Impact of Marine Integrated Power Systems” under supervision of prof. dr. sc. Ante Šestan. The scientific contribution of this thesis is in the improvement of methods of the evaluation of ship’s energy efficiency and environmental impact.

So far, he published 11 peer reviewed scientific papers, of which 3 in scientific journals indexed in SCOPUS, and 8 in international scientific conferences. In 2012 he participated in an industry project “Calculation and Analysis of the Attained EEDI for m/s Stoja” in cooperation with Uljanik Shipyard, Pula, Croatia. In 2015 he participated in a research project “Solar Hydrogen Fuel Station” with dr. sc. Ankica Đukić.

Currently he is a project manager of a research project “Influence of Innovative Energy Efficient Technologies on the GHG emissions from ships” under acronym “EKO-BROD” financed by the European Social Fund (ESF) and Croatian Ministry of Science, Education and Sports (MZOS).

He is an associate member of the two most important societies in the field of Marine Engineering: „*Royal Institution of Naval Architects*“ (RINA) from London, UK, and „*Society of Naval Architects and Marine Engineers*“ (SNAME) from Alexandria, USA. From 2013 to 2015 he was a member of the Faculty Council at UNIZAG FSB.

He speaks English and German.